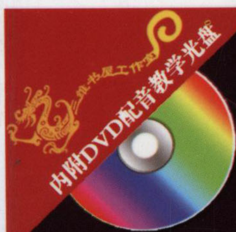
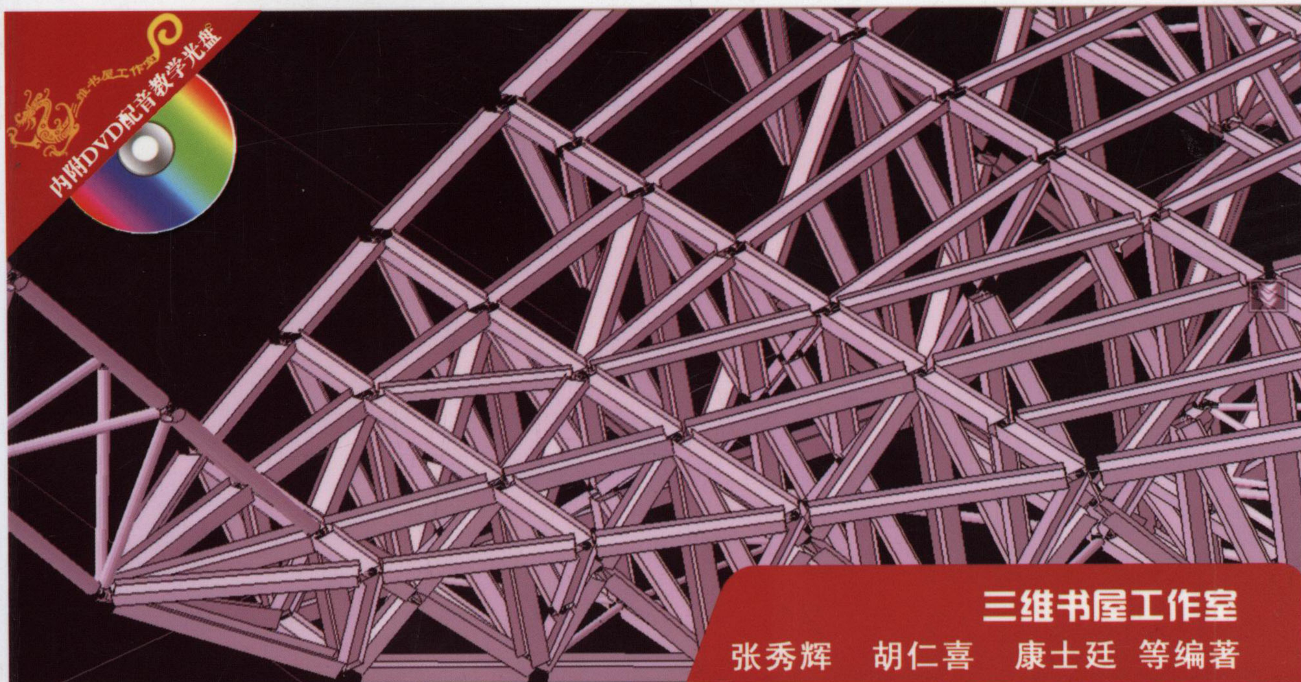




三维书屋工作室
张秀辉　胡仁喜　康士廷　等编著

ANSYS 14.0 有限元分析从入门到精通

视频操作 ▪ 源文件 ▪ 最终效果



全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导



本丛书包含各书目分别由ANSYS工程应用领域的专家和学者执笔编写，书中溶入了他们多年研究的经验和体会，为了便于读者快速掌握ANSYS工程开发技巧，书中引用大量的工程案例。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

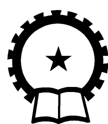
VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

ANSYS 14.0 有限元分析从入门到精通

三维书屋工作室

张秀辉　胡仁喜　康士廷　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS14.0 为依托，对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍，并结合典型工程应用实例详细讲述了 ANSYS 的具体工程应用方法。

本书前 7 章为操作基础，详细介绍了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法：第 1 章 ANSYS 概述；第 2 章几何建模；第 3 章建模实例；第 4 章网格划分；第 5 章施加载荷；第 6 章求解；第 7 章后处理。后 9 章为专题实例，按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧：第 8 章静力分析；第 9 章非线性分析；第 10 章模态分析；第 11 章接触问题分析；第 12 章瞬态动力学分析；第 13 章谱分析；第 14 章谐响应分析；第 15 章结构屈曲分析；第 16 章优化设计。

本书可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 ANSYS 软件的培训教材，也可作为从事结构分析相关行业的工程技术人员使用 ANSYS 软件的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 14.0 有限元分析从入门到精通/张秀辉等编著. —2 版. —北京：机械工业出版社，2012.12（2015.1 重印）

ISBN 978-7-111-40711-9

Ⅰ.①A… Ⅱ.①张… Ⅲ.①有限元分析—应用程序 Ⅳ.①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 293241 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：曲彩云 责任编辑：曲彩云
责任印制：刘 岚
北京中兴印刷有限公司印刷
2015 年 1 月第 2 版第 3 次印刷
184mm×260mm ·30.25 印张 · 746 千字
4 501—5 500 册
标准书号：ISBN 978-7-111-40711-9
ISBN 978-7-89433-741-2（光盘）
定价：69.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
	策划编辑：(010)88379782
社服务中心：(010)88361066	教 材 网：http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	封面无防伪标均为盗版

前　　言

有限元法作为数值计算方法中在工程分析领域应用较为广泛的一种计算方法，自 20 世纪中叶以来，以其独有的计算优势得到了广泛的应用，已出现了不同的有限元算法，并由此产生了一批非常成熟的通用和专业有限元商业软件。随着计算机技术的飞速发展，各种工程软件也得以广泛应用。ANSYS 软件以它的多物理场耦合分析功能而成为 CAE 软件的应用主流，在工程分析应用中得到了较为广泛的应用。

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析(FEA)软件，它是世界范围内增长最快的 CAE 软件，能够进行包括结构、热、声、流体以及电磁场等学科的研究，在核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医药、轻工、地矿、水利、家电等领域有着广泛的应用。ANSYS 的功能强大，操作简单方便，现在它已成为国际最流行的有限元分析软件，在历年 FEA 评比中都名列第一。目前，中国大多数科研院校采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件。

本书以 ANSYS 的最新版本 ANSYS 14.0 为依托，对 ANSYS 分析的基本思路、操作步骤、应用技巧进行了详细介绍，并结合典型工程应用实例详细讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。书中尽量避开了繁琐的理论描述，从实际应用出发，结合作者使用该软件的经验，实例部分采用 GUI 方式一步一步地对操作过程和步骤进行了讲解。为了帮助用户熟悉 ANSYS 的相关操作命令，在每个实例的后面列出了分析过程的命令流文件。

本书分为两部分，前 7 章为操作基础，详细介绍了 ANSYS 分析全流程的基本步骤和方法：第 1 章 ANSYS 概述；第 2 章几何建模；第 3 章建模实例；第 4 章网格划分；第 5 章施加载荷；第 6 章求解；第 7 章后处理。后 9 章为专题实例，按不同的分析专题讲解了各种分析专题的参数设置方法与技巧：第 8 章静力分析；第 9 章非线性分析；第 10 章模态分析；第 11 章接触问题分析；第 12 章瞬态动力学分析；第 13 章谱分析；第 14 章谐响应分析；第 15 章结构屈曲分析；第 16 章优化设计。

本书附有一张多媒体光盘，光盘中除了有每一个实例 GUI 实际操作步骤的视频以外，还以文本文件的格式给出了每个实例的命令流文件，用户可以直接调用。

本书由三维书屋工作室总策划，北京理工大学的张秀辉老师、军械工程学院的胡仁喜博士和康士廷主要编写，其中张秀辉执笔编写了第 1~10 章，胡仁喜执笔编写了 11~14 章，康士廷执笔编写了 15、16 章。张日晶、王培合、左昉、王玉秋、王义发、刘昌丽、王敏、周冰、董伟、李瑞、王艳池、郑长松、王文平、张俊生、路纯红等参加了部分编写工作。

本书可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习ANSYS软件的培训教材，也可作为从事结构分析相关行业的工程技术人员使用ANSYS软件的参考书。由于时间仓促，加之作者的水平有限，缺点和错误在所难免，恳请专家和广大读者不吝赐教，登录 www.sjzsanweishuwu.com或联系win760520@126.com批评指正。

作　者

目　录

前言

第 1 章　ANSYS概述 1

1.1　CAE软件简介 2
1.2 有限元法简介 3
1.2.1 有限元法的基本思想 3
1.2.2 有限元法的特点 4
1.3　ANSYS简介 5
1.3.1　ANSYS的发展 5
1.3.2　ANSYS的功能 5
1.3.3　ANSYS 14.0 的启动 7
1.3.4　ANSYS 14.0 运行环境配置 8
1.4　程序结构 8
1.4.1 处理器 9
1.4.2 文件格式 9
1.4.3 输入方式 9
1.4.4 输出文件类型 10
1.5　ANSYS分析的基本过程 10
1.5.1 前处理 10
1.5.2 加载并求解 11
1.5.3 后处理 11
1.5.4 实例导航——导弹发动机药柱承受温度和内压载荷数值模拟 11

第 2 章　几何建模 14

2.1 几何建模概论 15
2.1.1 自底向上创建几何模型 15
2.1.2 自顶向下创建几何模型 15
2.1.3 布尔运算操作 16
2.1.4 拖拉和旋转 17
2.1.5 移动和复制 17
2.1.6 修改模型（清除和删除） 17
2.1.7 从IGES文件几何模型导入到ANSYS 18
2.2 坐标系简介 18
2.2.1 总体和局部坐标系 18
2.2.2 显示坐标系 21
2.2.3 节点坐标系 21

2.2.4 单元坐标系 22
2.2.5 结果坐标系 23
2.3 工作平面的使用 23
2.3.1 定义一个新的工作平面 24
2.3.2 控制工作平面的显示和样式 25
2.3.3 移动工作平面 25
2.3.4 旋转工作平面 25
2.3.5 还原一个已定义的工作平面 25
2.3.6 工作平面的高级用途 26
2.4 自底向上创建几何模型 28
2.4.1 关键点 28
2.4.2 硬点 29
2.4.3 线 31
2.4.4 面 32
2.4.5 体 34
2.5 自顶向下创建几何模型（体素） 35
2.5.1 创建面体素 35
2.5.2 创建实体体素 36
2.6 使用布尔操作来修正几何模型 37
2.6.1 布尔运算的设置 37
2.6.2 布尔运算之后的图元编号 38
2.6.3 交运算 38
2.6.4 两两相交 39
2.6.5 相加 40
2.6.6 相减 40
2.6.7 利用工作平面作减运算 41
2.6.8 搭接 41
2.6.9 分割 42
2.6.10 粘接（或合并） 42
2.7 移动、复制和缩放几何模型 42
2.7.1 按照样本生成图元 43
2.7.2 由对称映像生成图元 44
2.7.3 将样本图元转换坐标系 44
2.7.4 实体模型图元的缩放 44
2.8 实例导航——导弹发动机药柱建模 45
2.8.1 自底向上建立药柱模型 45
2.8.2 布尔操作建立药柱模型 51

2.8.3 导入SolidWorks中创建的药柱模型 53

第 3 章　建模实例 55
3.1 实例导航——几何模型的输入 56
3.1.1 输入IGES单一实体 56
3.1.2 输入SAT 单一实体 58
3.1.3 输入SAT实体集合 61
3.1.4 输入Parasolid 单一实体 64
3.1.5 输入Parasolid实体集合 66
3.2 实例导航——对输入模型修改 69
3.3 实例导航——自主建模 72
3.3.1 自顶向下建模实例 72
3.3.2 自底向上建模实例 81

第 4 章　网格划分 91
4.1 有限元网格概论 92
4.2 设定单元属性 92
4.2.1 生成单元属性表 92
4.2.2 在划分网格之前分配单元属性 93
4.3 网格划分的控制 95
4.3.1 ANSYS网格划分工具（MeshTool） 95
4.3.2 单元形状 96
4.3.3 选择自由或映射网格划分 97
4.3.4 控制单元边中节点的位置 97
4.3.5 划分自由网格时的单元尺寸控制（SmartSizing） 97
4.3.6 映射网格划分中单元的默认尺寸 98
4.3.7 局部网格划分控制 99
4.3.8 内部网格划分控制 100
4.3.9 生成过渡棱锥单元 102
4.3.10 将退化的四面体单元转化为非退化的形式 102
4.3.11 执行层网格划分 103
4.4 自由网格划分和映射网格划分控制 103
4.4.1 自由网格划分 103
4.4.2 映射网格划分 104
4.5 给实体模型划分有限元网格 109
4.5.1 用xMESH命令生成网格 109
4.5.2 生成带方向节点的梁单元网格 110
4.5.3 在分界线或者分界面处生成单位厚度的界面单元 112

4.6 延伸和扫略生成有限元模型 113
4.6.1 延伸（Extrude）生成网格 113
4.6.2 扫略（VSWEEP）生成网格 115
4.7 修正有限元模型 117
4.7.1 局部细化网格 117
4.7.2 移动和复制节点和单元 120
4.7.3 控制面、线和单元的法向 121
4.7.4 修改单元属性 122
4.8 直接通过节点和单元生成有限元模型 123
4.8.1 节点 123
4.8.2 单元 125
4.9 编号控制 127
4.9.1 合并重复项 127
4.9.2 编号压缩 128
4.9.3 设定起始编号 129
4.9.4 编号偏差 129
4.10 实例导航——导弹发动机药柱模型网格划分 130
4.10.1 采用智能分网 131
4.10.2 采用扫略分网 132
4.10.3 采用延伸分网 136
第 5 章 施加载荷 141
5.1 载荷概论 142
5.1.1 什么是载荷 142
5.1.2 载荷步、子步和平衡迭代 143
5.1.3 时间参数 144
5.1.4 阶跃载荷与坡道载荷 144
5.2 施加载荷 145
5.2.1 实体模型载荷与有限单元载荷 145
5.2.2 施加载荷 146
5.2.3 利用表格来施加载荷 151
5.2.4 轴对称载荷与反作用力 154
5.2.5 利用函数来施加载荷和边界条件 155
5.3 设定载荷步选项 156
5.3.1 通用选项 157
5.3.2 非线性选项 160
5.3.3 动力学分析选项 161

5.3.4 输出控制 162
5.3.5 Biot-Savart选项 163
5.3.6 谱分析选项 163
5.3.7 创建多载荷步文件 163
5.4 实例导航——导弹发动机药柱模型载荷施加 165
5.4.1 单载荷步的施加 165
5.4.2 多载荷步的施加 167
5.4.3 表格及函数载荷的施加 170

第 6 章 求解 172

6.1 求解概论 173
6.1.1 使用直接求解法 174
6.1.2 使用稀疏矩阵直接求解法求解器 174
6.1.3 使用雅克比共轭梯度法求解器 174
6.1.4 使用不完全分解共轭梯度法求解器 175
6.1.5 使用预条件共轭梯度法求解器 175
6.1.6 使用自动迭代解法选项 176
6.1.7 获得解答 176
6.2 利用特定的求解控制器来指定求解类型 177
6.2.1 使用Abridged Solution 菜单选项 177
6.2.2 使用求解控制对话框 178
6.3 多载荷步求解 179
6.3.1 多重求解法 179
6.3.2 使用载荷步文件法 180
6.3.3 使用数组参数法（矩阵参数法） 181
6.4 重新启动分析 182
6.4.1 重新启动一个分析 183
6.4.2 多载荷步文件的重启动分析 186
6.5 预测求解时间和估计文件大小 188
6.5.1 估计运算时间 189
6.5.2 估计文件的大小 189
6.5.3 估计内存需求 189
6.6 实例导航——导弹发动机药柱模型求解 190
6.6.1 单载荷步求解 190
6.6.2 多载荷步求解 190

第 7 章 后处理 191

7.1 后处理概述 192

7.1.1 什么是后处理 192
7.1.2 结果文件 192
7.1.3 后处理可用的数据类型 193
7.2 通用后处理器（POST1）........ 193
7.2.1 将数据结果读入数据库 193
7.2.2 列表显示结果 200
7.2.3 图像显示结果 207
7.2.4 映射结果到某一路径上 213
7.2.5 表面操作 219
7.2.6 将结果旋转到不同坐标系中显示 223
7.3 时间历程后处理（POST26）........ 224
7.3.1 定义和储存POST26 变量 224
7.3.2 检查变量 227
7.3.3 POST26 后处理器的其他功能 229
7.4 实例导航——导弹发动机药柱模型结果后处理 230
7.4.1 通用后处理器 230
7.4.2 时间历程处理器 240

第 8 章 静力分析 243
8.1 静力分析介绍 244
8.1.1 结构静力分析简介 244
8.1.2 静力分析的类型 245
8.1.3 静力分析基本步骤 245
8.2 实例导航——悬臂梁的横向剪切应力分析 246
8.2.1 问题的描述 246
8.2.2 GUI路径模式 246
8.2.3 命令流方式 256
8.3 实例导航——联轴体的静力分析实例 256
8.3.1 问题描述 257
8.3.2 建立模型 257
8.3.3 定义边界条件并求解 261
8.3.4 查看结果 264
8.3.5 命令流方式 268

第 9 章 非线性分析 269
9.1 非线性分析概论 270
9.1.1 非线性行为的原因 270
9.1.2 非线性分析的基本信息 271

9.1.3 几何非线性 273
9.1.4 材料非线性 275
9.1.5 其他非线性问题 279
9.2 非线性分析的基本步骤 279
9.2.1 前处理（建模和分网） 279
9.2.2 设置求解控制器 279
9.2.3 设定其他求解选项 281
9.2.4 加载 283
9.2.5 求解 283
9.2.6 后处理 284
9.3 实例导航——螺栓的蠕变分析 285
9.3.1 问题描述 286
9.3.2 GUI 路径模式 286
9.3.3 命令流方式 293
第 10 章 模态分析 294
10.1 模态分析概论 295
10.2 模态分析的基本步骤 295
10.2.1 建模 295
10.2.2 加载及求解 296
10.2.3 扩展模态 299
10.2.4 观察结果和后处理 300
10.3 实例导航——压电变换器的自振频率分析 301
10.3.1 问题描述 301
10.3.2 GUI模式 302
10.3.3 命令流方式 314
第 11 章 接触问题分析 315
11.1 接触问题概论 316
11.1.1 一般分类 316
11.1.2 接触单元 316
11.2 接触 问题 分析的步骤 317
11.2.1 建立模型并划分网格 318
11.2.2 识别接触对 318
11.2.3 定义刚性目标面 318
11.2.4 定义柔性体的接触面 320
11.2.5 设置实常数和单元关键点 322

11.2.6 控制刚性目标的运动 323
11.2.7 给变形体单元施加必要的边界条件 323
11.2.8 定义求解和载荷步选项 323
11.2.9 求解 325
11.2.10 检查结果 325
11.3 实例导航——深沟球轴承的接触分析 326
11.3.1 问题描述 326
11.3.2 GUI方式 327
11.3.3 查看结果 336
11.3.4 命令流方式 337

第 12 章 瞬态动力学分析 339
12.1 瞬态动力学概论 340
12.1.1 完全法（Full Method） 340
12.1.2 模态叠加法（Mode Superposition Method） 340
12.1.3 减缩法（Reduced Method） 341
12.2 瞬态动力学的基本步骤 341
12.2.1 前处理（建模和分网） 341
12.2.2 建立初始条件 342
12.2.3 设定求解控制器 343
12.2.4 设定其他求解选项 344
12.2.5 施加载荷 345
12.2.6 设定多载荷步 345
12.2.7 瞬态求解 347
12.2.8 后处理 347
12.3 实例导航——哥伦布阻尼的自由振动分析 349
12.3.1 问题描述 350
12.3.2 GUI模式 350
12.3.3 命令流方式 362

第 13 章 谱分析 363
13.1 谱分析概论 364
13.1.1 响应谱 364
13.1.2 动力设计分析方法（DDAM） 364
13.1.3 功率谱密度（PSD） 364
13.2 谱分析的基本步骤 365
13.2.1 前处理 365
13.2.2 模态分析 365

13.2.3 谱分析 365
13.2.4 扩展模态 368
13.2.5 合并模态 369
13.2.6 后处理 371
13.3 实例导航——支撑平板的动力效果分析 372
13.3.1 问题描述 372
13.3.2 GUI路径模式 373
13.3.3 命令流方式 395
第 14 章 谐响应分析 396
14.1 谐响应分析概论 397
14.2 谐响应分析的基本步骤 398
14.2.1 建立模型（前处理） 398
14.2.2 加载和求解 398
14.2.3 观察模型（后处理） 404
14.3 实例导航——弹簧质子系统的谐响应分析 406
14.3.1 问题描述 406
14.3.2 GUI模式 407
14.3.3 命令流方式 419
第 15 章 结构屈曲分析 420
15.1 结构屈曲概论 421
15.2 结构屈曲分析的基本步骤 421
15.2.1 前处理 421
15.2.2 获得静力解 421
15.2.3 获得特征值屈曲解 422
15.2.4 扩展解 424
15.2.5 后处理（观察结果） 425
15.3 实例导航——桁架结构屈曲分析 426
15.3.1 问题描述 426
15.3.2 GUI 路径模式 426
15.3.3 命令流方式 440
第 16 章 优化设计 441
16.1 优化设计概论 442
16.2 优化设计的基本步骤 444
16.2.1 生成分析文件 444
16.2.2 建立优化过程中的参数 447

16.2.3 进入OPT处理器，指定分析文件 448
16.2.4 指定优化变量 448
16.2.5 选择优化工具或优化方法 449
16.2.6 指定优化循环控制方式 450
16.2.7 进行优化分析 451
16.2.8 查看设计序列结果 452
16.3 实例导航——框架结构的优化设计 453
16.3.1 问题描述 453
16.3.2 GUI方式 453
16.3.3 命令流方式 467

第 1 章

ANSYS 概述

本章首先介绍 CAE 技术及其有关基本知识，并由此引出了 ANSYS 的最新版本 14.0。讲述了新版本功能特点以及 ANSYS 程序结构和分析基本流程。

本章提纲挈领地介绍了 ANSYS 的基本知识，主要目的是给读者提供一个 ANSYS 感性认识。

学 习 要 点

- CAE 软件简介
- ANSYS 简介
- ANSYS14.0 产品及其功能
- ANSYS 分析的基本过程

1.1 CAE软件简介

由图 1-1 可以发现，各项产品测试皆在设计流程后期方能进行。因此，一旦发生问题，除了必须付出设计成本，而且相关前置作业也需改动，而且发现问题越晚，重新设计所付出的成本将会越高，若影响交货期或产品形象，损失更是难以估计，为了避免此情形的发生，预期评估产品的特质便成为设计人员的重要课题。

计算力学、计算数学、工程管理学特别是信息技术的飞速发展极大地推动了相关产业和学科研究地进步。有限元、有限体积及差分等方法与计算机技术相结合，诞生了新兴的跨专业和跨行业的学科。CAE 作为一种新兴的数值模拟分析技术，越来越受到工程技术人员的重视。在产品开发过程中引入 CAE 技术后，在产品尚未批量生产之前，不仅能协助工程人员做产品设计，更可以在争取订单时，作为一种强有力的工具协助营销人员及管理人员与客户沟通；在批量生产阶段，可以协助工程技术人员在重新更改时，找出问题发生的起点。在批量生产以后，相关分析结果还可以成为下次设计的重要依据。图 1-2 所示为引入 CAE 后产品设计流程图。

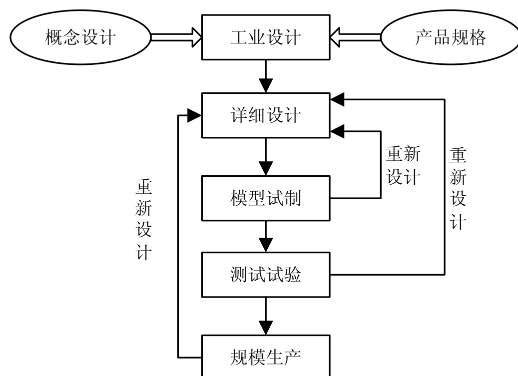


图 1-1 传统产品设计流程图

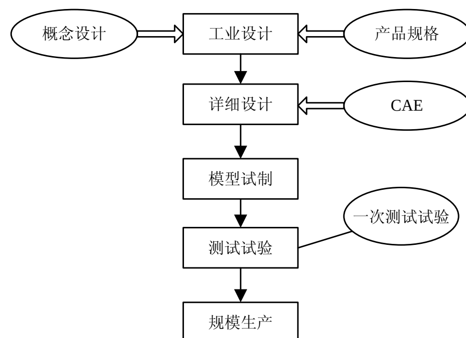


图 1-2 引入 CAE 后产品设计流程图

以电子产品为例，80％的电子产品都来自于高速撞击，研究人员往往耗费大量的时间和成本，针对产品做相关的质量试验，最常见的如落下与冲击试验，这些不仅耗费了大量的研发时间和成本，而且试验本身也存在很多缺陷，表现在：

- ✧ 试验发生的历程很短，很难观察试验过程的现象。
- ✧ 测试条件难以控制，试验的重复性很差。
- ✧ 试验时很难测量产品内部特性和观察内部现象。
- ✧ 一般只能得到试验结果，而无法观察试验原因。

引入 CAE 后可以在产品开模之前，透过相应软件对电子产品模拟自由落下试验（Free Drop Test）、模拟冲击试验（Shock Test）以及应力应变分析、振动仿真、温度分布分析等求得设计的最佳解，进而为一次试验甚至无试验可使产品通过测试规范提供了可能。

CAE 重要性：

（1）CAE 本身就可以看作一种基本试验。计算机计算弹体的侵彻与炸药爆炸过程以及各种非线性波的相互作用等问题，实际上是求解含有很多线性与非线性的偏微分方程、积分方程以及代数方程等的耦合方程组。利用解析方法求解爆炸力学问题是非常困难的，一般只能考虑一些很简单的问题。利用试验方法费用昂贵，还只能表征初始状态和最终状态，中间过程无法得知，因而也无法帮助研究人员了解问题的实质。而数值模拟在某种意义上比理论与试验对问题的认识更为深刻、更为细致，不仅可以了解问题的结果，而且可随时连续动态地、重复地显示事物的发展，了解其整体与局部的细致过程。

（2）CAE 可以直观地显示目前还不易观测到的、说不清楚的一些现象，容易为人理解和分析；还可以显示任何试验都无法看到的发生在结构内部的一些物理现象。如弹体在不均匀介质侵彻过程中的受力和偏转；爆炸波在介质中的传播过程和地下结构的破坏过程。同时，数值模拟可以替代一些危险、昂贵的甚至是难于实施的试验，如反应堆的爆炸事故，核爆炸的过程与效应等。

（3）CAE 促进了试验的发展，对试验方案的科学制定、试验过程中测点的最佳位置、仪表量程等的确定提供更可靠的理论指导。侵彻、爆炸试验费用是昂贵的，并存在一定危险，因此数值模拟不但有很大的经济效益，而且可以加速理论、试验研究的进程。

（4）一次投资，长期受益。虽然数值模拟大型软件系统的研制需要花费相当多的经费和人力资源，但和试验相比，数值模拟软件是可以进行复制移植、重复利用，并可进行适当修改而满足不同情况的需求。据相关统计数据显示，应用 CAE 技术后，开发期的费用占开发成本的比例，从 80％～90％下降到 8％～12％。

1.2 有限元法简介

1.2.1 有限元法的基本思想

在工程或物理问题的数学模型（基本变量、基本方程、求解域和边界条件等）确定以后，有限元法作为对其进行分析的数值计算方法的基本思想可简单概括为如下 3 点：

（1）将一个表示结构或连续体的求解域离散为若干个子域（单元），并通过它们边界上的结点相互联结为一个组合体，如图 1-3 所示。

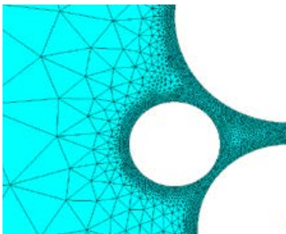


图 1-3 有限元法单元划分示意图

（2）用每个单元内所假设的近似函数来分片地表示全求解域内待求解的未知场变量。而每个单元内的近似函数由未知场函数（或其导数）在单元各个结点上的数值和与其对应的插值函数来表达。由于在联结相邻单元的结点上，场函数具有相同的数值，因而将它们作为数值求解的基本未知量。这样一来，求解原待求场函数的无穷多自由度问题转换为求解场函数结点值的有限自由度问题。

（3）通过和原问题数学模型（例如基本方程、边界条件等）等效的变分原理或加权余量法，建立求解基本未知量（场函数结点值）的代数方程组或常微分方程组。此方程组成为有限元求解方程，并表示成规范化的矩阵形式，接着用相应的数值方法求解该方程，从而得到原问题的解答。

1.2.2 有限元法的特点

（1）对于复杂几何构形的适应性：由于单元在空间上可以适用一维、二维或三维的，而且每一种单元可以有不同的形状，同时各种单元可以采用不同的连接方式，所以，工程实际中遇到的非常复杂的结构或构造都可以离散为由单元组合体表示的有限元模型。图 1-4 所示为一个三维实体的单元划分图。

（2）对于各种物理问题的适用性：由于用单元内近似函数分片地表示全求解域的未知场函数，并未限制场函数所满足的方程形式，也未限制各个单元所对应的方程必须有相同的形式，因此它适用于各种物理问题，例如线弹性问题、弹塑性问题、粘弹性问题、动力问题、屈曲问题、流体力学问题、热传导问题、声学问题、电磁场问题等，而且还可以用于各种物理现象相互耦合的问题。图 1-5 所示为一个热应力问题。

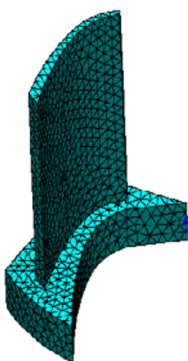


图 1-4 三维实体的单元划分模型

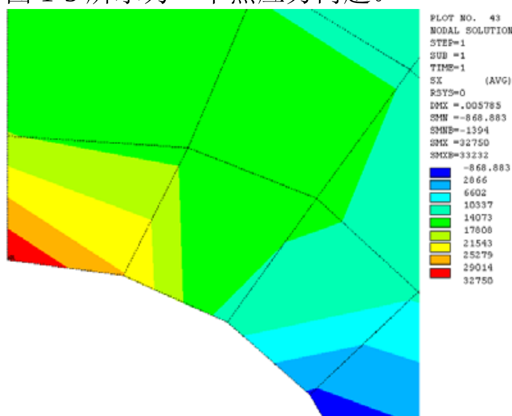


图 1-5 热应力问题

（3）建立于严格理论基础上的可靠性：因为用于建立有限元方程的变分原理或加权余量法在数学上已证明适微分方程和边界条件的等效积分形式，所以只要原问题的数学模型是正确的，同时用来求解有限元方程的数值算法是稳定可靠的，则随着单元数目的增加（即单元尺寸的缩小）或者是随着单元自由度数的增加（即插值函数阶次的提高），有限元解的近似程度不断地被改进。如果单元是满足收敛准则的，则近似解最后收敛于

原数学模型的精确解。

（4）适合计算机实现的高效性：由于有限元分析的各个步骤可以表达成规范化的矩阵形式，最后导致求解方程可以统一为标准的矩阵代数问题，特别适合计算机的编程和执行。随着计算机硬件技术的高速发展以及新的数值算法的不断出现，大型复杂问题的有限元分析已成为工程技术领域的常规工作。

1.3 ANSYS简介

ANSYS 软件是融合结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等一般工业及科学研究。该软件可在大多数计算机及操作系统中运行，从 PC 到工作站直到巨型计算机，ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。ANSYS 多物理场耦合的功能，允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算成本，如：热-结构耦合、磁-结构耦合以及电-磁-流体-热耦合，在 PC 上生成的模型同样可运行于巨型机上，这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解。

1.3.1 ANSYS的发展

ANSYS 能与多数 CAD 软件结合使用，实现数据共享和交换，如 AutoCAD、I-DEAS、Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 软件提供了一个不断改进的功能清单，具体包括：结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变/有限转动功能以及利用 ANSYS 参数设计语言（APDL）的扩展宏命令功能。基于 Motif 的菜单系统使用户能够通过对话框、下拉式菜单和子菜单进行数据输入和功能选择，为用户使用 ANSYS 提供“导航”。

1.3.2 ANSYS的功能

1．结构分析

◆ 静力分析——用于静态载荷。可以考虑结构的线性及非线性行为，例如：大变形、大应变、应力刚化、接触、塑性、超弹性及蠕变等。

◆ 模态分析——计算线性结构的自振频率及振形，谱分析是模态分析的扩展，用于计算由随机振动引起的结构应力和应变（也叫做响应谱或 PSD）。

◆ 谐响应分析——确定线性结构对随时间按正弦曲线变化的载荷的响应。

◆ 瞬态动力学分析——确定结构对随时间任意变化的载荷的响应。可以考虑与静力分析相同的结构非线性行为。

◆ 特征屈曲分析——用于计算线性屈曲载荷并确定屈曲模态形状（结合瞬态动力学分析可以实现非线性屈曲分析）。

◆ 专项分析——断裂分析、复合材料分析、疲劳分析。

专项分析用于模拟非常大的变形，惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。它的显式方程求解冲击、碰撞、快速成型等问题，是目前求解这类问题最有效的方法。

2．ANSYS 热分析

热分析一般不是单独的，其后往往进行结构分析，计算由于热膨胀或收缩不均匀引起的应力。热分析包括以下类型：

◆ 相变（熔化及凝固）——金属合金在温度变化时的相变，如铁合金中马氏体与奥氏体的转变。

◆ 内热源（例如电阻发热等）——存在热源问题，如加热炉中对试件进行加热。

◆ 热传导——热传递的一种方式，当相接触的两物体存在温度差时发生。

◆ 热对流——热传递的一种方式，当存在流体、气体和温度差时发生。

◆ 热辐射——热传递的一种方式，只要存在温度差时就会发生，可以在真空中进行。

3．ANSYS 电磁分析

电磁分析中考虑的物理量是磁通量密度、磁场密度、磁力、磁力矩、阻抗、电感、涡流、耗能及磁通量泄漏等。磁场可由电流、永磁体、外加磁场等产生。磁场分析包括以下类型：

◆ 静磁场分析——计算直流电（DC）或永磁体产生的磁场。

◆ 交变磁场分析——计算由于交流电（AC）产生的磁场。

◆ 瞬态磁场分析——计算随时间随机变化的电流或外界引起的磁场。

◆ 电场分析——用于计算电阻或电容系统的电场。典型的物理量有电流密度、电荷密度、电场及电阻热等。

◆ 高频电磁场分析——用于微波及 RF 无源组件，波导、雷达系统、同轴连接器等。

4．ANSYS 流体分析

流体分析主要用于确定流体的流动及热行为。流体分析包括以下类型：

◆ CFD（Coupling Fluid Dynamic 耦合流体动力）——ANSYS/FLOTRAN 提供强大的计算流体动力学分析功能，包括不可压缩或可压缩流体、层流及湍流以及多组分流等。

◆ 声学分析——考虑流体介质与周围固体的相互作用，进行声波传递或水下结构的动力学分析等。

◆ 容器内流体分析——考虑容器内的非流动流体的影响。可以确定由于晃动引起的静力压力。

◆ 流体动力学耦合分析——在考虑流体约束质量的动力响应基础上，在结构动力学分析中使用流体耦合单元。

5．ANSYS 耦合场分析

耦合场分析主要考虑两个或多个物理场之间的相互作用。如果两个物理场之间相互影响，单独求解一个物理场是不可能得到正确结果的，因此需要一个能够将两个物理场

组合到一起求解的分析软件。例如：在压电力分析中，需要同时求解电压分布（电场分析）和应变（结构分析）。

1.3.3　ANSYS 14.0 的启动

用交互式方式启动 ANSYS：选择”开始” > “程序” > “ANSYS 14.0” > “Mechanical APDL (ANSYS)”即可启动。界面如图 1-6 所示，或者选择”开始” > “程序” > “ANSYS 14.0” > “ANSYS Product Launcher”进入运行环境设置，如图 1-7 所示，设置完成之后单击“Run”按钮，也可以启动 ANSYS 14.0。

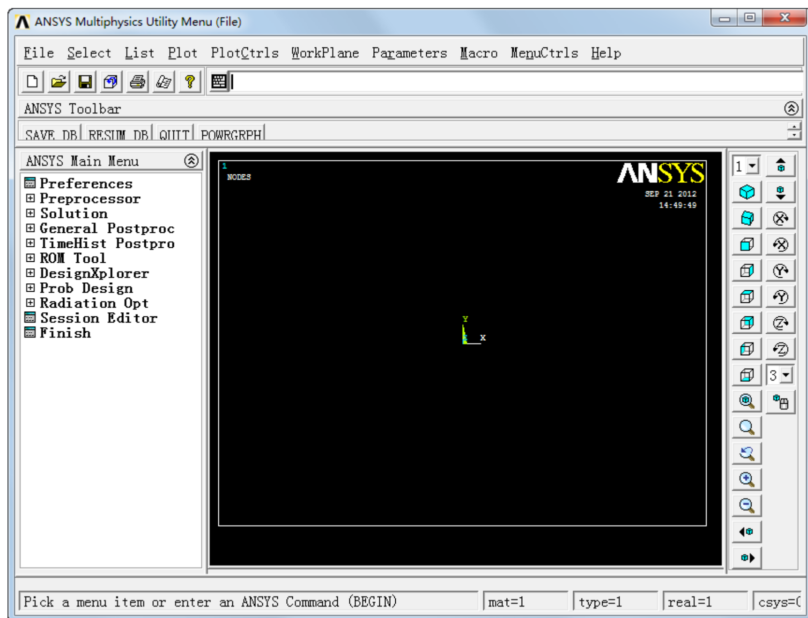


图 1-6　启动 ANSYS 用户界面

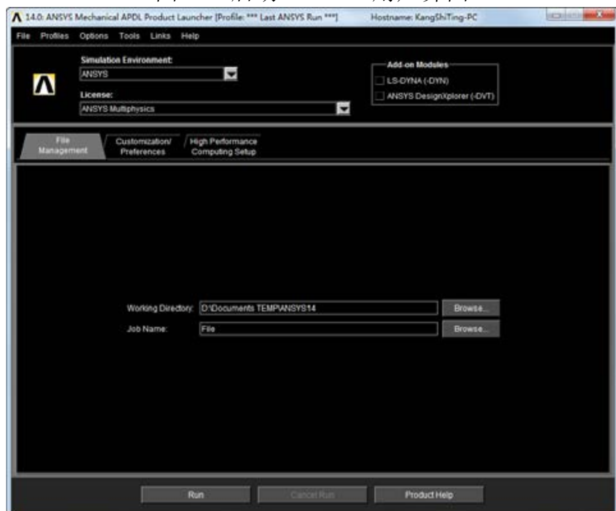


图 1-7 ANSYS 运行环境设置（1）

1.3.4　ANSYS 14.0 运行环境配置

ANSYS 14.0 运行环境配置主要是在启动界面设置以下选项（如图 1-7）：

1．选择 ANSYS 产品

ANSYS 软件是融合结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元软件，需要针对不同的分析项目选择不同的 ANSYS 产品。

2．选择 ANSYS 的工作目录

ANSYS 所有生成的文件都将写在此目录下。默认为上次定义的目录。

3．选择图形设备名称

一般默认为 win32 选项，如果配置了 3D 显卡则选择 3D，如图 1-8 所示。

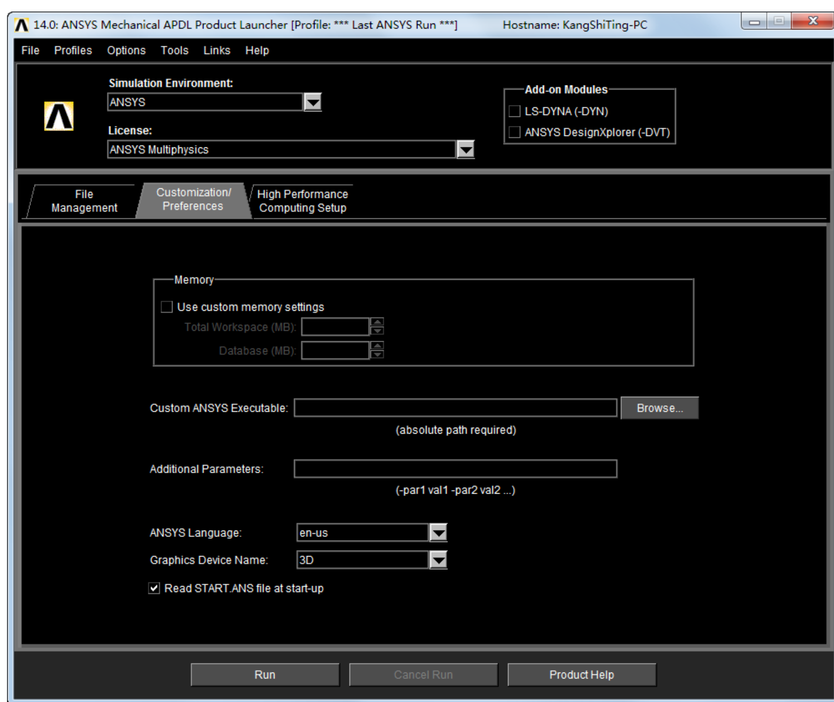


图 1-8　ANSYS 运行环境设置（2）

4．设定初始工作文件名

默认为上次运行定义的工作文件名，第一次运行默认为 file。

5．设定 ANSYS 工作空间及数据库大小

一般选择默认值即可，如图 1-8 所示。

1.4 程序结构

ANSYS 系统把各个分析过程分为一些模块进行操作，一个问题的分析主要可以经过这些模块的分步操作实现，各个模块组成了程序的结构。

1.4.1 处理器

- ◆ 前处理器
- ◆ 求解器
- ◆ 通用后处理器
- ◆ 时间历程后处理器
- ◆ 拓扑优化
- □ 优化设计等

以上 6 个模块基本是按照操作顺序排列的，在分析一个问题时，大致是按照以上模块从上到下的顺序操作的。

1.4.2 文件格式

ANSYS 中涉及到的主要文件的类型及格式如表 1-1 所示。

表 1-1 文件的类型及格式

文件的类型	文件的名称	文件的格式
日志文件	Jobname.LOG	文本
错误文件	Jobname.ERR	文本
输出文件	Jobname.OUT	文本
数据文件	Jobname.DB	二进制
结果文件： 结构或其耦合 热 磁场 流体	Jobname.xxx Jobname.RST Jobname.RTH Jobname.RMG Jobname.RFL	二进制
载荷步文件	Jobname.Sn	文本
图形文件	Jobname.GRPH	文本（特殊格式）
单元矩阵文件	Jobname.EMA T	二进制

1.4.3 输入方式

1．交互方式运行 ANSYS

交互方式运行 ANSYS，可以通过菜单和对话框来运行 ANSYS 程序，在该方式下，可以很容易地运行 ANSYS 的图形功能、在线帮助和其他工具。也可以根据喜好来改变交互方式的布局。ANSYS 图形交互界面的构成有：应用菜单、工具条、图形窗口、输出窗口、输入窗口和主菜单。

2．命令方式运行 ANSYS

命令方式运行 ANSYS，是在命令的输入窗口输入命令来运行 ANSYS 程序，该方式比交互式运行要方便和快捷，但对操作人员的要求较高。

1.4.4 输出文件类型

一般来说不同的分析类型有不同的文件类型，除了上面列出的文件外，表 1-2 列出了 ANSYS 分析时产生的临时文件类型。

表 1-2 临时文件类型

文件名称	文件格式	文件内容
ANO	文本	图形窗口的命令
BAT	文本	从 batch 文件中输入的数据
DO*n*	文本	Do-loop 命令中的计数值
DSCR	二进制	模态分析中的 Scratch 文件
EROT	二进制	单元旋转矩阵
LSCR	二进制	高级模态分析中的 Scratch 文件
LV	二进制	在子结构中产生并随多个载荷矢量传递的 Scratch 文件
LNxx	二进制	从 sparse 求解器产生的 Scratch 文件
MASS	二进制	模态分析中的压缩质量矩阵（子空间方法）
MMX	二进制	模态分析中的工作矩阵（子空间方法）
PAGE	二进制	ANSYS 虚拟内存的页面文件（数据库空间）
PCS	文本	从 PCG 求解器产生的 Scratch 文件
PC*n*	二进制	从 PCG 求解器产生的 Scratch 文件（n=1 到 10）
SCR	二进制	从雅可比梯度求解器产生的 Scratch 文件
SSCR	二进制	从子结构求解器产生的 Scratch 文件

1.5 ANSYS分析的基本过程

ANSYS 分析过程包含 3 个主要的步骤：前处理、加载并求解、后处理。

1.5.1 前处理

前处理是指创建实体模型以及有限元模型。它包括创建实体模型，定义单元属性，划分有限元网格，修正模型等几项内容。大部分的有限元模型都是用实体模型建模，类似于 CAD，ANSYS 以数学的方式表达结构的几何形状，然后在里面划分节点和单元，还可以在几何模型边界上方便地施加载荷，但是实体模型并不参与有限元分析，所以施加在几何实体边界上的载荷或约束必须最终传递到有限元模型上（单元或节点）进行求解，这个过程通常是 ANSYS 程序自动完成的。可以通过 4 种途径创建 ANSYS 模型：

（1）在 ANSYS 环境中创建实体模型，然后划分有限元网格。

（2）在其他软件（比如 CAD）中创建实体模型，然后读入到 ANSYS 环境，经过修正后划分有限元网格。

（3）在 ANSYS 环境中直接创建节点和单元。

（4）在其他软件中创建有限元模型，然后将节点和单元数据读入 ANSYS。

单元属性是指划分网格以前必须指定的所分析对象的特征，这些特征包括：材料属性、单元类型、实常数等。需要强调的是，除了磁场分析以外不需要告诉 ANSYS 使用的是什么单位制，只需要自己决定使用何种单位制，然后确保所有输入值的单位制统一，单位制影响输入的实体模型尺寸、材料属性、实常数及载荷等。

1.5.2 加载并求解

（1）自由度 DOF——定义节点的自由度（DOF）值（例如结构分析的位移，热分析的温度，电磁分析的磁势等）。

（2）面载荷（包括线载荷）——作用在表面的分布载荷（例如结构分析的压力，热分析的热对流，电磁分析的麦克斯韦尔表面等）。

（3）体积载荷——作用在体积上或场域内（例如热分析的体积膨胀和内生成热，电磁分析的磁流密度等）。

（4）惯性载荷——结构质量或惯性引起的载荷（例如重力，加速度等）。

在求解之前应进行分析数据检查，包括以下内容：

（1）单元类型和选项，材料性质参数，实常数以及统一的单位制。

（2）单元实常数和材料类型的设置，实体模型的质量特性。

（3）确保模型中没有不应存在的缝隙（特别是从 CAD 中输入的模型）。

（4）壳单元的法向，节点坐标系。

（5）集中载荷和体积载荷，面载荷的方向。

（6）温度场的分布和范围，热膨胀分析的参考温度。

1.5.3 后处理

（1）通用后处理（POST1）——用来观看整个模型在某一时刻的结果

（2）时间历程后处理（POST26）——用来观看模型在不同时间段或载荷步上的结果，常用于处理瞬态分析和动力分析的结果。

1.5.4 实例导航——导弹发动机药柱承受温度和内压载荷数值模拟

本实例的问题来源于导弹中的发动机药柱承受温度和内压载荷的数值模拟。

1．模型描述

药柱的模型如图 1-9 所示，尺寸如图 1-10 所示，单位为 mm，假设药柱总长为 1m。

药柱在固化冷却到低温实验时，由于药柱的冷却收缩将使得药柱内部产生残余热应力；同时导弹工作时，药柱的星形内腔将承受压强载荷的作用，因此需要分析药柱在工作过程中的结构完整性，研究确定其受力薄弱的地方。假设药柱为各向同性的弹性材料，设弹性模量为“3.5e+6MPa”，泊松比为0.499，热膨胀系数为“0.652e-6/℃”。



图 1-9 三维实体药柱模型

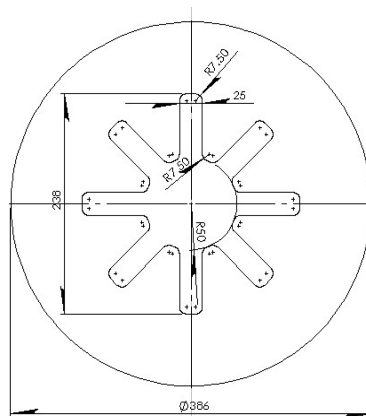


图 1-10 药柱尺寸图

2．进入 ANSYS

在进行一个新的有限元分析时，通常需要修改数据库名，并在图形输出窗口中定义一个标题来说明当前进行的工作内容。先启动“ANSYS Product Launcher”后，在启动界面中定义工作文件路径，输入分析文件名“Grain”（如图 1-11 所示），单击“Run”按钮进入 ANSYS 图形交互界面。

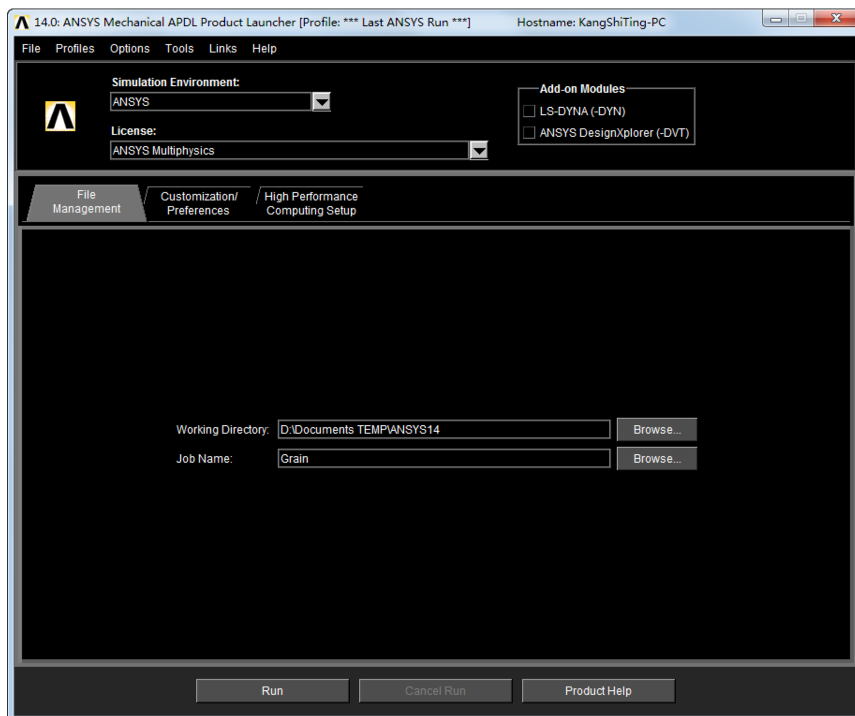


图 1-11　ANSYS 启动界面

3．解题类型设置

对于不同的分析范畴（结构分析、热分析、流体分析、电磁场分析等），ANSYS 所用的主菜单的内容不尽相同，为此，需要在分析开始时选定分析内容的范畴，以便 ANSYS 显示出与其相对应的菜单选项。单击“ANSYS Main Menu”中的“Preferences”，弹出 ANSYS 图形交互界面对话框，选中“Structural”复选框（解题类型设置为结构问题），单击“OK”按钮，如图 1-12 所示。接下来可以在界面中建立模型，划分网格，施加载荷，求解等操作了。

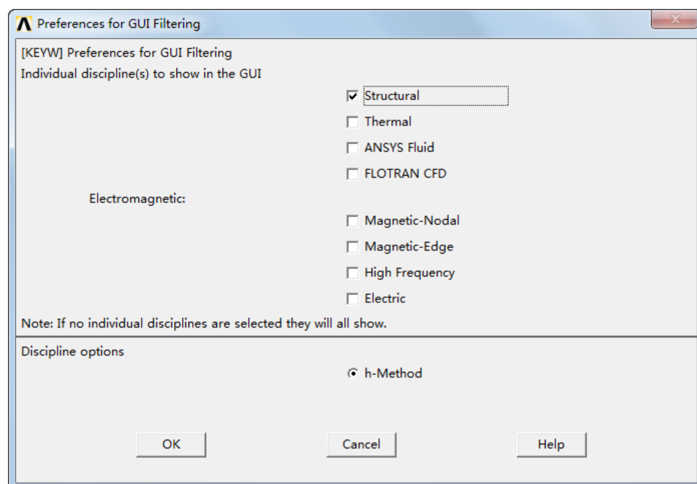


图 1-12　设置解题类型

第 2 章

几何建模

有限元分析是针对特定的模型而进行的，因此，用户必须建立一个有物理原型的准确数学模型。通过几何建模，可以描述模型的几何边界，为之后的网格划分和施加载荷建立模型基础，因此它是整个有限元分析的基础。

学习要点

- 坐标系
- 工作平面
- 自底向上和自顶向下创建几何模型
- 布尔操作

2.1 几何建模概论

有限元分析的最终目的是还原一个实际工程系统的数学行为特征，换句话说，分析必须是针对一个物理原型的准确的数学模型。由节点和单元构成的有限元模型与结构系统的几何外形是基本一致的，广义上讲，模型包括所有的节点、单元、材料属性、实常数、边界条件，以及用来表现这个物理系统的特征，所有这些特征都反映在有限元网格及其设定上面。在 ANSYS 中，有限元模型的建立分为直接法和间接法，直接法是直接根据结构的几何外形建立节点和单元而得到有限元模型，它一般只适用于简单的结构系统。间接法是利用点、线、面和体等基本图元，先建立几何外形，再对该模型进行实体网格划分，以完成有限元模型的建立，因此它适用于节点及单元数目较多的复杂几何外形的结构系统。下面对间接法建立几何模型作简单的介绍。

2.1.1 自底向上创建几何模型

所谓的自底向上，顾名思义就是由建立模型的最低单元的点到最高单元的体来构造实体模型。即首先定义关键点（keypoints），然后利用这些关键点定义较高级的实体图元，如线（lines）、面（areas）和体（volume），这就是所谓的自底向上的建模方法，如图 2-1 所示。一定要牢记自底向上构造的有限元模型是在当前激活的坐标系内定义的。

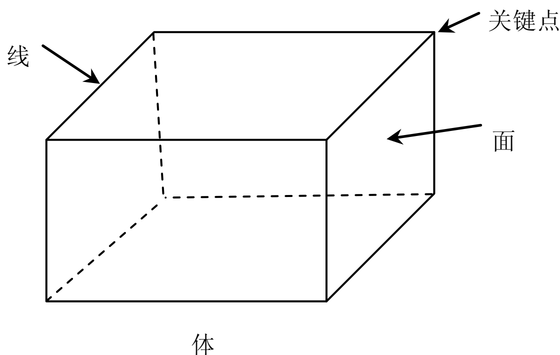


图 2-1 自底向上构造模型

2.1.2 自顶向下创建几何模型

ANSYS 软件允许通过汇集线、面、体等几何体素的方法构造模型。当生成一种体素时，ANSYS 程序会自动生成所有从属于该体素的较低级图元，这种一开始就从较高级的实体图元构造模型的方法就是所谓的自顶向下的建模方法，如图 2-2 所示。可以根据需要自由地组合自底向上和自顶向下的建模技术。注意几何体素是在工作平面内建立的，而自底向上的建模技术是在激活的坐标系上定义的。如果混合使用这两种技术，那么应

该考虑使用“CSYS，WP”或“CSYS，4”命令强迫坐标系跟随工作平面变化。另外，建议不要在环坐标系中进行实体建模操作，因为会生成其他不想要的面或体。

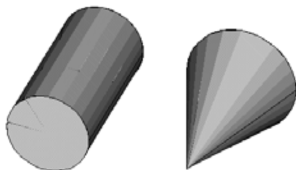


图 2-2 自顶向下构造模型（几何体素）

2.1.3 布尔运算操作

可以使用求交、相减或其他布尔操作来雕刻实体模型。通过布尔操作，可以直接用较高级的图元生成复杂的形体，如图 2-3 所示。布尔运算对于通过自底向上或自顶向下方法生成的图元均有效。

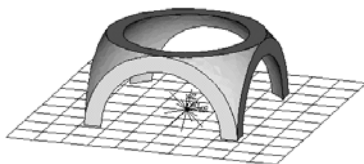


图 2-3 使用布尔运算生成的复杂形体

创建模型时要用到布尔操作，ANSYS 具有以下布尔操作功能：

加：把相同的几个体素（点、线、面、体）合在一起形成一个体素。

减：从相同的几个体素（点、线、面、体）中去掉相同的另外几个体素。

粘接：将两个图元连接到一起，并保留各自边界，如图 2-4 所示。考虑到网格划分，由于网格划分器划分几个小部件比划分一个大部件更加方便，因此粘接常常比加操作更加适合。

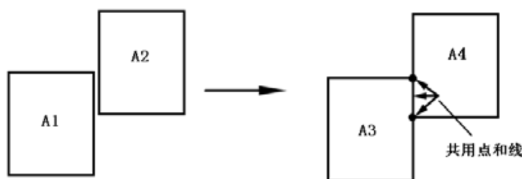


图 2-4 粘接操作

叠分：操作与粘接功能基本相同，不同的是叠分操作输入的图元具有重叠的区域。

分解： 将一个图元分解为两个图元，但两者之间保持连接。可用于将一个复杂体修剪剖切为多个规则体，为网格划分带来方便。分解操作的“剖切工具” 可以是工作平面、面或线。

相交：是把相重叠的图元形成一个新的图元。

2.1.4 拖拉和旋转

布尔运算尽管很方便，但一般需耗费较多的计算时间，所以在构造模型时，可以采用拖拉或者旋转的方法建模，如图 2-5 所示。它往往可以节省很多计算时间，提高效率。

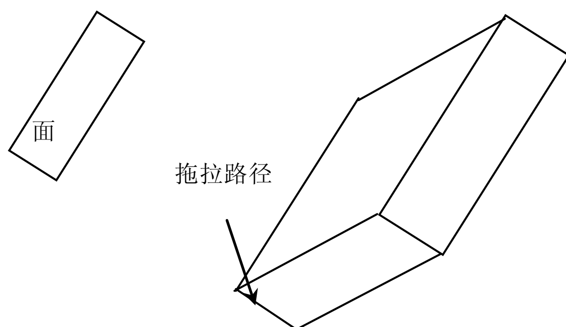


图 2-5 拖拉一个面生成一个体

2.1.5 移动和复制

一个复杂的面或体在模型中重复出现时仅需构造一次。之后可以移动、旋转或者复制到所需的地方，如图 2-6 所示。会发现在方便之处生成几何体素再将其移动到所需之处，往往比直接改变工作平面生成所需体素更方便。图中黑色区域表示原始图元，其余都是复制生成。

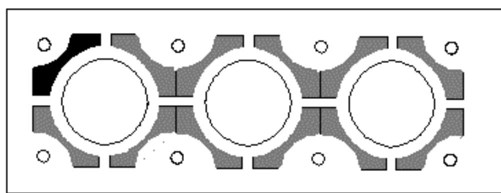
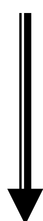


图 2-6 复制一个面

2.1.6 修改模型（清除和删除）

在修改模型时，需要知道实体模型和有限元模型中图元的层次关系，不能删除依附于较高级图元上的低级图元。例如：不能删除已划分网格的体，也不能删除依附于面上的线等。若一个实体已经加了载荷，那么删除或修改该实体时附加在该实体上的载荷也将从数据库中删除。图元中的层次关系如下：

高级图元：



单元（包括单元载荷）

节点（包括节点载荷）

实体（包括实体载荷）

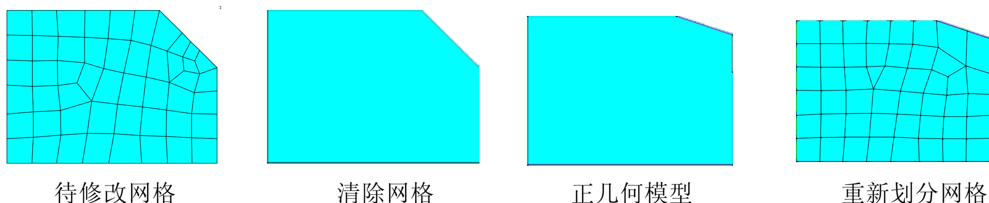
面（包括面载荷）

线（包括线载荷）

关键点（包括点载荷）

低级图元

在修改已划分网格的实体模型时，首先必须清楚该实体模型上所有的节点和单元，然后可以自顶而下地删除或者重新定义图元，以达到修改模型的目的，如图 2-7 所示。



待修改网格　　清除网格　　正几何模型　　重新划分网格

图 2-7 修改已划分网格的模型

2.1.7 从IGES文件几何模型导入到ANSYS

可以在 ANSYS 里直接建立模型，也可以先在 CAD 系统里建立实体模型，然后把模型存为 IGES 文件格式，再把这个模型输入到 ANSYS 系统中，一旦模型成功地输入，就可以像在 ANSYS 中创建的模型那样对这个模型进行修改和划分网格。

2.2 坐标系简介

ANSYS 有多种坐标系供选择：

（1）总体和局部坐标系：用来定位几何形状参数（节点、关键点等）和空间位置。

（2）显示坐标系：用于几何形状参数的列表和显示。

（3）节点坐标系：定义每个节点的自由度和节点结果数据的方向。

（4）单元坐标系：确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。

（5）结果坐标系：用来列表、显示或在通用后处理操作中将节点和单元结果转换到一个特定的坐标系中。

2.2.1 总体和局部坐标系

总体坐标系和局部坐标系用来定位几何体。默认地，当定义一个节点或关键点时，其坐标系为总体笛卡尔坐标系。可是对有些模型，定义为不是总体笛卡尔坐标系的另外

坐标系可能更方便。ANSYS 程序允许用任意预定义的 3 种（总体）坐标系的任意一种来输入几何数据，或者在任何其他定义的（局部）坐标系中进行此项工作。

1．总体坐标系

总体坐标系被认为是一个绝对的参考系。ANSYS 程序提供了前面定义的 3 种总体坐标系：笛卡尔坐标系、柱坐标系和球坐标系，所有这 3 种坐标系都是右手系，而且有共同的原点。

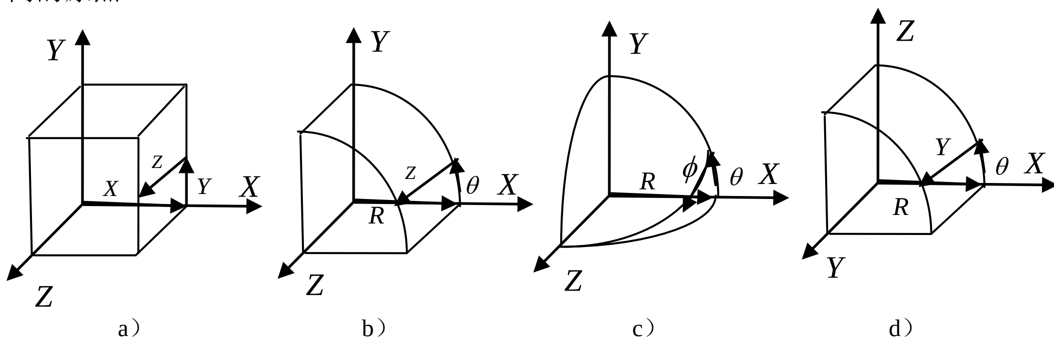


图 2-8 总体坐标系

图 2-8a 表示笛卡尔坐标系；图 2-8b 表示一类圆柱坐标系（其 *Z* 轴同笛卡尔坐标系的 *Z* 轴一致），坐标系统标号是 1；图 2-8c 表示球坐标系，坐标系统标号是 2；图 2-8d 表示两类圆柱坐标系（*Z* 轴与笛卡尔坐标系的 *Y* 轴一致），坐标系统标号是 3。

2．局部坐标系

在许多情况下，必须要建立自己的坐标系。其原点与总体坐标系的原点偏移一定距离，或其方位不同于先前定义的总体坐标系，图 2-9 表示一个局部坐标系的示例，它是通过用于局部、节点或工作平面坐标系旋转的欧拉旋转角来定义的。可以按以下方式定义局部坐标系：

（1）按总体笛卡尔坐标定义局部坐标系：

命令：LOCAL。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At Specified Loc +。

（2）通过已有节点定义局部坐标系：

命令：CS

GUI： Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > By 3 Nodes +。

（3）通过已有关键点定义局部坐标系：

命令：CSKP。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > By 3 Keypoints +。

（4）在当前定义的工作平面的原点为中心定义局部坐标系：

命令：CSWPLA。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At

WP Origin。

图 2-8 中X，Y，Z表示总体坐标系，然后通过旋转该总体坐标系来建立局部坐标系。图 2-9a表示将总体坐标系绕Z轴旋转一个角度得到X_1，Y_1，Z（Z_1）；图 2-9b表示将X_1，Y_1，Z（Z_1）绕X_1轴旋转一个角度得到X_1（X_2），Y_2，Z_2。

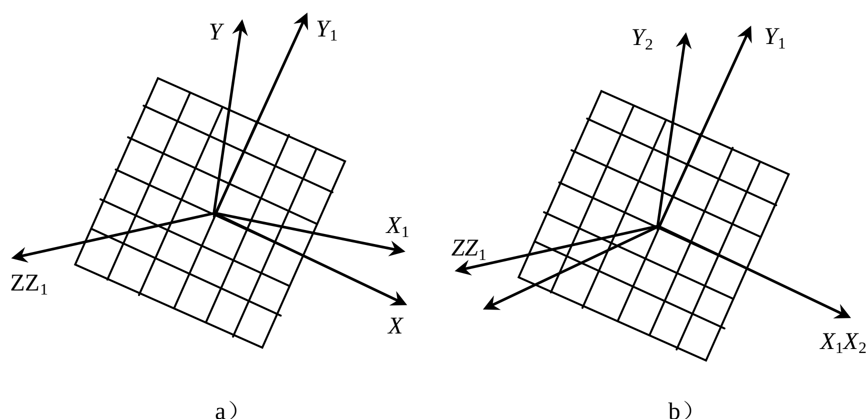


图 2-9 局部坐标系

当定义了一个局部坐标系后，它就会被激活。当创建了局部坐标系后，分配给它一个坐标系号（必须是 11 或更大），可以在 ANSYS 程序中的任何阶段建立或删除局部坐标系。若要删除一个局部坐标系，可以利用下面方法：

命令：CSDELE。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Delete Local CS。

若要查看所有的总体和局部坐标系，可以使用下面的方法：

命令：CSLIST。

GUI：Utility Menu > List > Other > Local Coord Sys。

与 3 个预定义的总体坐标系类似，局部坐标系可以是笛卡尔坐标系、柱坐标系或球坐标系。局部坐标系可以是圆的，也可以是椭圆的，另外，还可以建立环形局部坐标系，如图 2-10 所示。

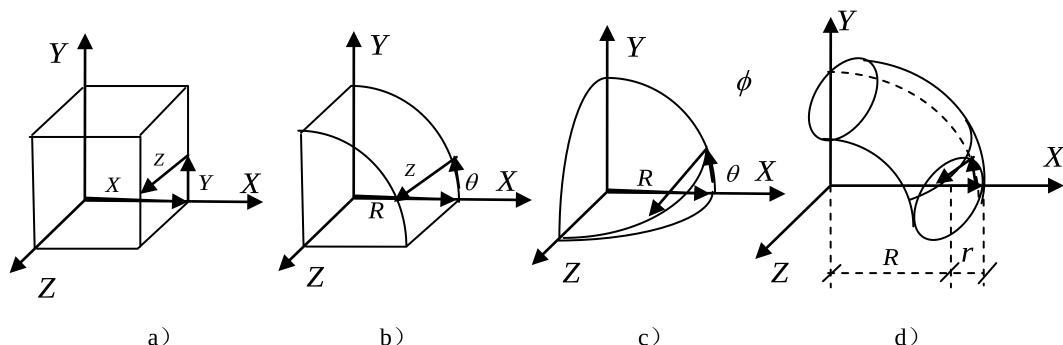


图 2-10 局部坐标系类型

图 2-10a 表示局部笛卡尔坐标系；图 2-10b 表示局部圆柱坐标系；图 2-10c 表示局部球坐标系；图 2-10d 表示局部环坐标系。

3. 坐标系的激活

可以定义多个坐标系，但某一时刻只能有一个坐标系被激活。激活坐标系的方法如下：首先自动激活总体笛卡尔坐标系，当定义一个新的局部坐标系，这个新的坐标系就会自动被激活，如果要激活一个与总体坐标系或以前定义的坐标系，可用下列方法：

命令：CSYS。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Spherical。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coord Sys。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane。

在 ANSYS 程序运行的任何阶段都可以激活某个坐标系，若没有明确地改变激活的坐标系，当前激活地坐标系将一直保持不变。

在定义节点或关键点时，不管哪个坐标系是激活的，程序都将坐标标为 X、Y 和 Z，如果激活的不是笛卡尔坐标系，应将 X、Y 和 Z 理解为柱坐标中的 R、θ、Z 或球坐标系中的 R、θ、φ。

2.2.2 显示坐标系

在默认情况下，即使是在坐标系中定义的节点和关键点，其列表都显示它们在总体笛卡尔坐标，可以用下列方法改变显示坐标系：

命令：DSYS。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Global Cartesian。

Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Global Cylindrical。

Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Global Spherical。

Utility Menu > WorkPlane > Change Display CS to > Specified Coord Sys。

改变显示坐标系也会影响图形显示。除非有特殊的需要，一般在用诸如“NPLOT，EPLOT”命令显示图形时，应将显示坐标系重置为总体笛卡尔坐标系。DSYS 命令对 LPLOT，APLOT 和 VPLOT 命令无影响。

2.2.3 节点坐标系

总体和局部坐标系用于几何体的定位，而节点坐标系则用于定义节点自由度的方向。每个节点都有自己的节点坐标系，默认情况下，它总是平行于总体笛卡尔坐标系（与定义节点的激活坐标系无关）。可用下列方法将任意节点坐标系旋转到所需方向，如图 2-11 所示。

（1）将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向。即节点坐标系的 X 轴转成平行于激活坐标系的 X 轴或 R 轴，节点坐标系的 Y 轴旋转到平行于激活坐标系的 Y 或 θ 轴，节点坐

标系的 Z 轴转成平行于激活坐标系的 Z 或 ϕ轴。

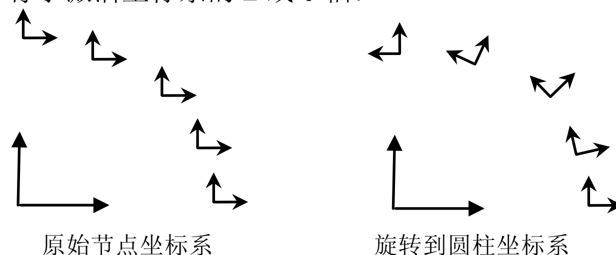


图 2-11 节点坐标系

命令：NROTAT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > To Active CS。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > To Active CS。

（2）按给定的旋转角旋转节点坐标系（因为通常不易得到旋转角，因此 NROTAT 命令可能更有用），在生成节点时可以定义旋转角，或对已有节点制定旋转角（NMODIF 命令）。

命令：N。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS。

命令：NMODIF。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Angles。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Angles。

可以用下列方法列出节点坐标系相对于总体笛卡尔坐标系旋转的角度：

命令：NANG。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Vectors。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Vectors。

命令：NLIST。

GUI：Utility Menu > List > Nodes。

Utility Menu > List > Picked Entities > Nodes。

2.2.4 单元坐标系

每个单元都有自己的坐标系，单元坐标系用于规定正交材料特性的方向，施加压力和显示结果（如应力应变）的输出方向。所有的单元坐标系都是正交右手系。

大多数单元坐标系的默认方向遵循以下规则：

（1）线单元的 *X* 轴通常从该单元的 *I* 节点指向 *J* 节点。

（2）壳单元的 *X* 轴通常也取 *I* 节点到 *J* 节点的方向，*Z* 轴过 *I* 点且与壳面垂直，其正方向由单元的 *I*、*J* 和 *K* 节点按右手法则确定，*Y* 轴垂直于 *X* 轴和 *Z* 轴。

（3）对二维和三维实体单元的单元坐标系总是平行于总体笛卡尔坐标系。

并非所有的单元坐标系都符合上述规则，对于特定单元坐标系的默认方向可参考 ANSYS 帮助文档单元说明部分。许多单元类型都有选项（KEYOPTS，在 DT 或 KETOPT 命令中输入），这些选项用于修改单元坐标系的默认方向。对面单元和体单元而言，可用下列命令将单元坐标的方向调整到已定义的局部坐标系上：

命令：ESYS。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes。

如果既用了 KEYOPT 命令又用了 ESYS 命令，则 KEYOPT 命令的定义有效。对某些单元而言，通过输入角度可相对先前的方向作进一步旋转，例如 SHELL63 单元中的实常数 THETA。

2.2.5 结果坐标系

在求解过程中，计算的结果数据有位移（UX，UY，ROTS 等），梯度（TGX，TGY 等），应力（SX，SY，SZ 等），应变（EPPLX，EPPLXY 等）等，这些数据存储在数据库和结果文件中，要么是在节点坐标系（初始或节点数据），要么是单元坐标系（导出或单元数据）。但是，结果数据通常是旋转到激活的坐标系（默认为总体坐标系）中来进行云图显示、列表显示和单元数据存储（ETABLE 命令）等操作。

可以将活动的结果坐标系转到另一个坐标系（如总体坐标系或一个局部坐标系），或转到在求解时所用的坐标系下（例如，节点和单元坐标系）。如果列表、显示或操作这些结果数据，则它们将首先被旋转到结果坐标系下。利用下列方法可改变结果坐标系：

命令：RSYS。

GUI：Main Menu > General Postproc > Options for Output。

Utility Menu > List > Results > Options。

2.3 工作平面的使用

尽管光标在屏幕上只表现为一个点，但它实际上代表的是空间中垂直于屏幕的一条线。为了能用光标拾取一个点，首先必须定义一个假想的平面，当该平面与光标所代表的垂线相交时，能唯一地确定空间中的一个点，这个假想的平面就是工作平面。从另一种角度想象光标与工作平面的关系，可以描述为光标就像一个点在工作平面上来回游荡，工作平面因此就如同在上面写字的平板一样，工作平面可以不平行于显示屏，如图 2-12 所示。

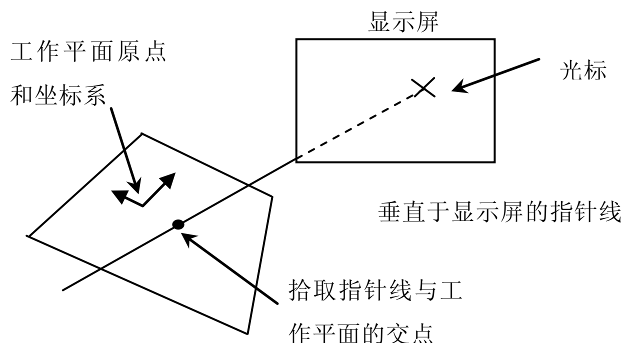


图 2-12 显示屏、光标、工作平面及拾取点之间的关系

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系、捕捉增量和显示栅格。在同一时刻只能定义一个工作平面（当定义一个新的工作平面时就会删除已有的工作平面）。工作平面是与坐标系独立使用的。例如，工作平面与激活的坐标系可以有不同的原点和旋转方向。

进入 ANSYS 程序时，有一个默认的工作平面，即总体笛卡尔坐标系的 *X*-*Y* 平面。工作平面的 *X*、*Y* 轴分别取为总体笛卡尔坐标系的 *X* 轴和 *Y* 轴。

2.3.1 定义一个新的工作平面

可以用下列方法定义一个新的工作平面：

（1）由三点定义一个工作平面：

命令：WPLANE。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > XYZ Locations。

（2）由三个节点定义一个工作平面：

命令：NWPLAN。

GUI： Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Nodes。

（3）由三个关键点定义一个工作平面：

命令：KWPLAN。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Keypoints。

（4）通过一指定线上的点的垂直于该直线的平面定义为工作平面：

命令：LWPLAN。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Plane Normal to Line。

（5）通过现有坐标系的 X-Y（或 R-θ）平面定义工作平面：

命令：WPCSYS。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Active Coord Sys。

Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Global Cartesian。

Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Specified Coord Sys。

2.3.2 控制工作平面的显示和样式

为获得工作平面的状态（即位置、方向、增量）可用下面的方法：

命令：WPSTYL,STAT。

GUI：Utility Menu > List > Status > Working Plane。

将工作平面重置为默认状态下的位置和样式，利用命令 WPSTYL，DEFA。

2.3.3 移动工作平面

可以将工作平面移动到与原位置平行的新的位置，方法如下：

（1）将工作平面的原点移动到关键点：

命令：KWPAVE。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Keypoints。

（2）将工作平面的原点移动到节点：

命令：NWPAVE。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Nodes。

（3）将工作平面的原点移动到指定点：

命令：WPAVE。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Global Origin。

Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Origin of Active CS。

Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations。

（4）偏移工作平面

命令：WPOFFS。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments。

2.3.4 旋转工作平面

可以将工作平面旋转到一个新的方向，可以在工作平面内旋转 X-Y 轴，也可以使整个工作平面都旋转到一个新的位置。如果不清楚旋转角度，利用前面的方法可以很容易地在正确的方向上创建一个新的工作平面。旋转工作平面的方法如下：

命令：WPROTA。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments。

2.3.5 还原一个已定义的工作平面

尽管实际上不能存储一个工作平面，但可以在工作平面的原点创建一个局部坐标系，然后利用这个局部坐标系还原一个已定义的工作平面。

在工作平面的原点创建局部坐标系的方法如下：

命令：CSWPLA。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At WP Origin。

利用局部坐标系还原一个已定义的工作平面的方法如下：

命令：WPCSYS。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Active Coord Sys。

Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Global Cartesian。

Utility Menu > WorkPlane > Align WP with > Specified Coord Sys。

2.3.6 工作平面的高级用途

用 WPSTYL 命令或前面讨论的 GUI 方法可以增强工作平面的功能，使其具有捕捉增量、显示栅格、恢复容差和坐标类型的功能。然后，就可以迫使坐标系随工作平面的移动而移动，方法如下：

命令：CSYS。

GUI：Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Global Spherical。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coordinate Sys。

Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane。

Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Global Origin。

1．捕捉增量

如果没有捕捉增量功能，在工作平面上将光标定位到已定义的点上将是一件非常困难的事情。为了能精确地拾取，可以用 WPSTYL 命令或相应的 GUI 建立捕捉增量功能。一旦建立了捕捉增量（snap increment），拾取点（picked location）将定位在工作平面上最近的点，数学上表示如下，当光标在区域（assigned location）：

$$N*SNAP - SNAP/2 \leq X < N*SNAP + SNAP/2$$

对任意整数N，拾取点的X坐标为：$X_P = N*SNAP$

在工作平面坐标系中的 X，Y 坐标均可建立捕捉增量，捕捉增量也可以看成是个方框，拾取到方框的点将定位于方框的中心，如图 2-13 所示。

2．显示栅格

可以在屏幕上建立栅格以帮助用户观察工作平面上的位置。栅格的间距、状况和边界可由“WPSTYL”命令来设定（栅格与捕捉点无任何关系）。发出不带参量的“WPSTYL”命令控制栅格在屏幕上的打开和关闭。

3．恢复容差

需拾取的图元可能不在工作平面上，而在工作平面的附近，这时，通过“WPSTYL”

命令和 GUI 路径指定恢复容差，在此容差内的图元将认为是在工作平面上的。这种容差就如同在恢复拾取时，给了工作平面一个厚度。

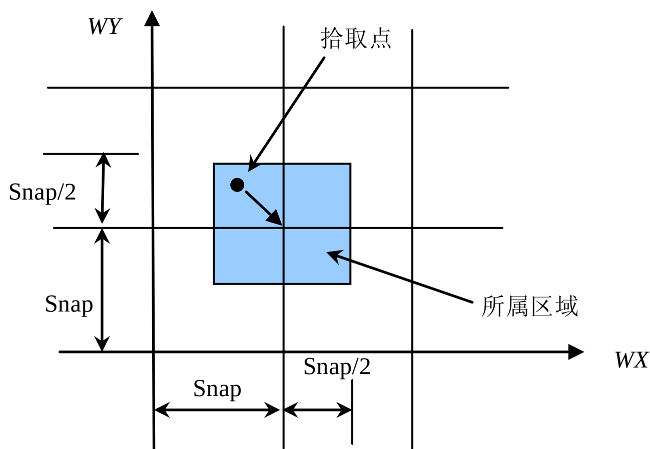


图 2-13 捕捉增量

4．坐标系类型

ANSYS 系统有两种可选的工作平面：笛卡尔坐标系和极坐标系工作平面。我们通常采用笛卡尔坐标系工作平面，但当几何体容易在极坐标系（r，θ）系中表述时可能用到极坐标系工作平面。图 2-14 所示为用“WPSTYL”命令激活的极坐标工作平面的栅格。在极坐标平面中拾取操作与在笛卡尔坐标工作平面中的是一致的。对捕捉参数进行定位的栅格点的标定是通过指定待捕捉点之间的径向距离（SNAP ON WPSTYL）和角度（SNAPANG）来实现的。

5．工作平面的轨迹

如果用与坐标系会合在一起的工作平面定义几何体，可能发现工作平面是完全与坐标系分离的。例如，当改变或移动工作平面时，坐标系并不作出反映新工作平面类型或位置的变化。这可能使用户结合使用拾取（靠工作平面）和键盘输入体如关键点（用激活的坐标系）变得无效。例如：将工作平面从默认位置移开，然后想在新的工作平面的原点用键盘输入定义一个关键点（即 K，1205，0，0）会发现关键点落在坐标系的原点而不是工作平面的原点。

如果想强迫激活的坐标系在建模时跟着工作平面一起移动，可以在用 CSYS 命令或相应的 GUI 路径时利用一个选项来自动完成。命令：CSYS，WP 或 CSYS4 或者 GUI：Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane，将迫使激活的坐标系与工作平面有相同的类型（如笛卡尔）和相同的位置。那么，尽管用户离开了激活的坐标系 WP 或 4，在移动工作平面时，坐标系将随其一起移动。如果改变所用工作平面的类型，坐标系也将相应更新。例如，当将工作平面从笛卡尔转为极坐标系时，激活的坐标系也将从笛卡尔坐标系转到柱坐标系。

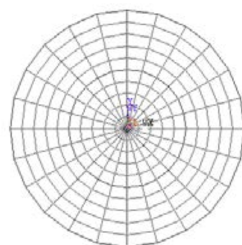


图 2-14 极坐标工作平面栅格

如果重新来看上面讨论的例子，加入想在自己移动工作平面之后将一个关键点放置在工作平面的原点，但这次在移动工作平面之前激活跟踪工作平面，命令：CSYS，WP或 GUI：Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane，然后像前面一样移动工作平面，现在，当使用键盘定义关键点（即 K，1205，0，0），这个关键点将被放在工作平面的原点，因为坐标系与工作平面的方位一致。

2.4 自底向上创建几何模型

无论是使用自底向上还是自顶向下的方法构造实体模型，均由关键点（keypoints）、线（lines）、面（areas）和体（volumes）组成，如图 2-15 所示。

顶点为关键点，边为线，表面为面，而整个物体内部为体。这些图元底层次关系是：最高级的体图元以次高级的面图元为边界，面图元又以线图元为边界，线图元则以关键点图元为端点。

2.4.1 关键点

用自底向上的方法构造模型时，首先定义最低级的图元：关键点。关键点是在当前激活的坐标系内定义的。不必总是按从低级到高级的办法定义所有的图元来生成高级图元，可以直接在它们的顶点由关键点来直接定义面和体。中间的图元需要时可自动生成。例如，定义一个长方体可用 8 个角的关键点来定义，ANSYS 程序会自动地生成该长方形中所有地面和线。可以直接定义关键点，也可以从已有的关键点生成新的关键点，定义好关键点后，可以对它进行查看、选择和删除等操作。

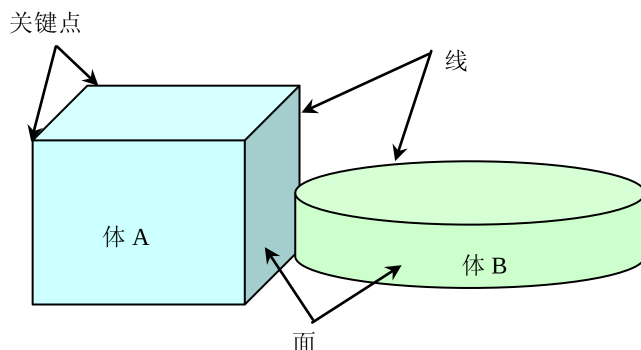


图 2-15 基本实体模型图元

1．定义关键点

定义关键点的命令及 GUI 菜单路径如表 2-1 所示。

2．从已有的关键点生成关键点

从已有的关键点生成关键点的的命令及 GUI 菜单路径如表 2-2 所示。

表 2-1 定义关键点

位置	命令	GUI 路径
在当前坐标系下	K	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > On Working Plane
在线上的指定位置	KL	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > On Line Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > On Line w/Ratio

表 2-2 从已有的关键点生成关键点

位置	命令	GUI 菜单路径
在两个关键点之间创建一个新的关键点	KEBTW	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > KP between KPs
在两个关键点之间填充多个关键点	KFILL	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Fill between KPs
在三点定义的圆弧中心定义关键点	KCENTER	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > KP at Center
由一种模式的关键点生成另外的关键点	KGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints
从已给定模型的关键点生成一定比例的关键点	KSCALE	该命令没有菜单模式
通过映像产生关键点	KSYMM	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Keypoints
将一种模式的关键点转到另外一个坐标系中	KTRAN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Keypoints
给未定义的关键点定义一个默认位置	SOURCE	该命令没有菜单模式
计算并移动一个关键点到一个交点上	KMOVE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Keypoint > To Intersect
在已有节点出定义一个关键点	KNODE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > On Node
计算两关键点之间的距离	KDIST	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Check Geom > KP distances
修改关键点的坐标系	KMODIF	MainMenu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Keypoints > Set of KPs MainMenu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Keypoints > Single KP

3．查看、选择和删除关键点

查看、选择和删除关键点的命令及 GUI 菜单路径如表 2-3 所示。

2.4.2 硬点

硬点实际上是一种特殊的关键点，它表示网格必须通过的点。硬点不会改变模型的几何形状和拓扑结构，大多数关键点命令如 FK、KLIST 和 KSEL 等都适用于硬点，而且它还有自己的命令集和 GUI 路径。

如果发出更新图元几何形状的命令，例如布尔操作或者简化命令，任何与图元相连的硬点都将自动删除；不能用复制、移动或修改关键点的命令操作硬点；当使用硬点时，

不支持映射网格划分。

表 2-3 查看、选择和删除关键点

用途	命令	GUI 菜单路径
列表显示关键点	KLIST	Utility Menu > List > Keypoint > Coordinates +Attributes Utility Menu > List > Keypoint > Coordinates only Utility Menu > List > Keypoint > Hard Points
选择关键点	KSEL	Utility Menu > Select > Entities
屏幕显示关键点	KPLOT	Utility Menu > Plot > Keypoints > Keypoints Utility Menu > Plot > Specified Entities > Keypoints
删除关键点	KDELE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Keypoints

1．定义硬点

定义硬点的命令及 GUI 菜单路径如表 2-4 所示。

表 2-4 定义硬点

位置	命令	GUI 菜单路径
在线上定义硬点	HPTCREATE LINE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on line > Hard PT by ratio Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on line > Hard PT by coordinates Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on line > Hard PT by picking
在面上定义硬点	HPTCREATE AREA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on area > Hard PT by coordinates Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on area > Hard PT by picking

2．选择硬点

选择硬点的命令及 GUI 菜单路径如表 2-5 所示。

表 2-5 选择硬点

位置	命令	GUI 菜单路径
硬点	KSEL	Utility Menu > Select > Entities
附在线上的硬点	LSEL	Utility Menu > Select > Entities
附在面上的硬点	ASEL	Utility Menu > Select > Entities

3．查看和删除硬点

查看和删除硬点的命令及 GUI 菜单路径如表 2-6 所示。

表 2-6 查看和删除硬点

用途	命令	GUI 菜单路径
列表显示硬点	KLIST	Utility Menu > List > Keypoint > Hard Points
列表显示线及附属的硬点	LLIST	该命令没有相应 GUI 路径
列表显示面及附属的硬点	ALIST	该命令没有相应 GUI 路径
屏幕显示硬点	KPLOT	Utility Menu > Plot > Keypoints > Hard Points
删除硬点	HPTDELETE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Hard Points

2.4.3 线

线主要用于表示实体的边。像关键点一样，线是在当前激活的坐标系内定义的。并不总是需要明确地定义所有的线，因为 ANSYS 程序在定义面和体时，会自动生成相关的线。只有在生成线单元（例如梁）或想通过线来定义面时，才需要专门定义线。

1．定义线

定义线的命令及 GUI 菜单路径如表 2-7 所示。

表 2-7 定义线

用法	命令	GUI 菜单路径
在指定的关键点之间创建直线（与坐标系有关）	L	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord
通过 3 个关键点创建弧线（或者时通过两个关键点和指定半径创建弧线）	LARC	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > By End KPs & Rad Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > Through 3 KPs
创建多义线	BSPLIN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Splines > Spline thru KPs Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Splines > Spline thru Locs Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Splines > With Options > Spline thru KPs Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Splines > With Options > Spline thru Locs
创建圆弧线	CIRCLE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > By Cent & Radius Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > Full Circle
创建分段式多义线	SPLINE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Splines > Segmented Spline Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Splines > With Options > Segmented Spline
创建与另一条直线成一定角度的直线	LANG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > At Angle to Line Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Normal to Line
创建与另外两条直线成一定角度的直线	L2ANG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Angle to 2 Lines Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Norm to 2 Lines
创建一条与已有线共终点且相切的线	LTAN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Tan to 2 Lines
生成一条与两条线相切的线	L2TAN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Tan to 2 Lines
生成一个面上两关键点之间最短的线	LAREA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Overlaid on Area
通过一个关键点按一定路径延伸成线	LDRAG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines
使一个关键点按一条轴旋转生成线	LROTAT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > About Axis
在两相交线之间生成倒角线	LFILLT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Line Fillet
生成与激活坐标系无关的直线	LSTR	Main Menu > Preprocessor > Create > Lines > Lines > Straight Line

2．从已有线生成新线

从已有的线生成线的命令及 GUI 菜单路径如表 2-8 所示。

表 2-8 生成新的线

用法	命令	GUI 菜单路径
通过已有线生成新线	LGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Lines Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Lines
从已有线对称映像生成新线	LSYMM	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Lines
将已有线转到另一个坐标系	LTRAN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Lines

3．修改线

修改线的命令及 GUI 菜单路径如表 2-9 所示。

表 2-9 修改线

用法	命令	GUI 菜单路径
将一条线分成更小的线段	LDIV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line into 2 Ln's Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line into N Ln's Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Lines w/ Options
将一条线与另一条线合并	LCOMB	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Lines
将线的一端延长	LEXTND	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extend Line

4．查看和删除线

查看和删除线的命令及 GUI 菜单路径如表 2-10 所示。

表 2-10 查看和删除线

用法	命令	GUI 菜单路径
列表显示线	LLIST	Utility Menu > List > Lines Utility Menu > List > Picked Entities > Lines
屏幕显示线	LPLOT	Utility Menu > Plot > Lines Utility Menu > Plot > Specified Entities > Lines
选择线	LSEL	Utility Menu > Select > Entities
删除线	LDELE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Line and Below Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Lines Only

2.4.4 面

平面可以表示二维实体（例如平板和轴对称称实体）。曲面和平面都可以表示三维的面，例如壳，三维实体的面等。跟线类似，只有用到面单元或者由面生成体时，才需要专门定义面。生成面的命令将自动生成依附于该面的线和关键点，同样，面也可以在定义体时自动生成。

1．定义面

定义面的命令及 GUI 菜单路径如表 2-11 所示。

表 2-11 定义面

用法	命令	GUI 菜单路径
通过顶点定义一个面（即通过关键点）	A	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs
通过其边界线定义一个面	AL	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines
沿一条路径拖动一条线生成面	ADRAG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Along Lines
沿一轴线旋转一条线生成面	AROTAT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > About Axis
在两面之间生成倒角面	AFILLT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Area Fillet
通过引导线生成光滑曲面	ASKIN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Skinning
通过偏移一个面生成新的面	AOFFST	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Offset

2．通过已有面生成新的面

通过已有面生成新的面的命令及 GUI 菜单路径如表 2-12 所示。

表 2-12 生成新的面

用法	命令	GUI 菜单路径
通过已有面生成另外的面	AGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Areas Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Areas > Areas
通过对称映像生成面	ARSYM	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas
将面转到另外的坐标系下	ATRAN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Areas
复制一个面的部分	ASUB	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Overlaid on Area

3．查看、选择和删除面

查看、选择和删除面的命令及 GUI 菜单路径如表 2-13 所示。

表 2-13 查看、选择和删除面

用法	命令	GUI 菜单路径
列表显示面	ALIST	Utility Menu > List > Areas Utility Menu > List > Picked Entities > Areas
屏幕显示面	APLOT	Utility Menu > Plot > Areas Utility Menu > Plot > Specified Entities > Areas
选择面	ASEL	Utility Menu > Select > Entities
删除面	ADELE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Areas Only

2.4.5 体

体用于描述三维实体，仅当需要用体单元时才必须建立体，生成体的命令将自动生成低级的图元。

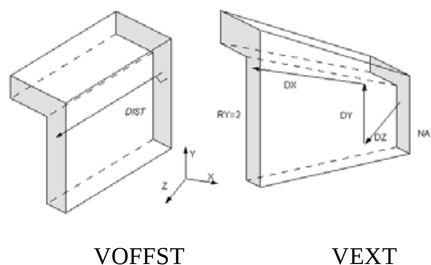
1．定义体

定义体的命令及 GUI 菜单路径如表 2-14 所示。

表 2-14 定义体

用法	命令	GUI 菜单路径
通过顶点定义体（即通过关键点）	V	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > Through KPs
通过边界定义体（即用一系列的面来定义）	VA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > By Areas
将面沿某个路径拖拉生成体	VDRAG	Main Menu > Preprocessor > Operate > Extrude > Along Lines
将面沿某根轴旋转生成体	VROTAT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > About Axis
将面沿其法向偏移生成体	VOFFST	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal
在当前坐标系下对面进行拖拉和缩放生成体	VEXT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > By XYZ Offset

其中，VOFFST 和 VEXT 操作示意图如图 2-16 所示。



VOFFST　　　　VEXT

图 2-16　VOFFST 和 VEXT 操作示意图

2．通过已有的体生成新的体

通过已有的体生成新的体的命令及 GUI 菜单路径如表 2-15 所示。

表 2-15 生成新的体

用法	命令	GUI 菜单路径
由一种模式的体生成另外的体	VGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volumes
通过对称映像生成体	VSYMM	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes
将体转到另外的坐标系	VTRAN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Volumes

3．查看、选择和删除体

查看、选择和删除体的命令及 GUI 菜单路径如表 2-16 所示。

表 2-16 查看、选择和删除体

用法	命令	GUI 菜单路径
列表显示体	VLIST	Utility Menu > List > Picked Entities > Volumes Utility Menu > List > Volumes
屏幕显示体	VPLOT	Utility Menu > Plot > Specified Entities > Volumes Utility Menu > Plot > Volumes
选择体	VSEL	Utility Menu > Select > Entities
删除体	VDELE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volumes Only

2.5 自顶向下创建几何模型（体素）

几何体素是用单个 ANSYS 命令创建常用实体模型（如球，正棱柱等）。因为体素是高级图元，不用先定义任何关键点而形成，所以称利用体素进行建模的方法为自顶向下建模。当生成一个体素时，ANSYS 程序会自动生成所有属于该体素的必要的低级图元。

2.5.1 创建面体素

创建面体素的命令及 GUI 菜单路径如表 2-17 所示。

表 2-17 创建面体素

用法	命令	GUI 菜单路径
在工作平面上创建矩形面	RECTNG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions
通过角点生成矩形面	BLC4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners
通过中心和角点生成矩形面	BLC5	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Centr & Cornr
在工作平面上生成以其原点为圆心的环形面	PCIRC	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Circle > By Dimensions
在工作平面上生成环形面	CYL4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Circle > Annulus or > Partial Annulus or > Solid Circle
通过端点生成环形面	CYL5	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Circle > By End Points
以工作平面原点为中心创建正多边形	RPOLY	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Polygon > By Circumscr Rad or > By Inscribed Rad or > By Side Length
在工作平面的任意位置创建正多边形	RPR4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Polygon > Hexagon or > Octagon or > Pentagon or > Septagon or > Square or > Triangle
基于工作平面坐标对生成任意多边形	POLY	该命令没有相应 GUI 路径

2.5.2 创建实体体素

创建实体体素的命令及 GUI 菜单路径如表 2-18 所示。

表 2-18 创建实体体素

用法	命令	GUI 菜单路径
在工作平面上创建长方体	BLOCK	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions
通过角点生成长方体	BLC4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By 2 Corners & Z
通过中心和角点生成长方体	BLC5	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Centr,Cornr,Z
以工作平面原点为圆心生成圆柱体	CYLIND	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By Dimensions
在工作平面的任意位置创建圆柱体	CYL4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Hollow Cylinder or > Partial Cylinder or > Solid Cylinder
通过端点创建圆柱体	CYL5	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By End Pts & Z
以工作平面的原点为中心创建正棱柱体	RPRISM	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Prism > By Circumscr Rad or > By Inscribed Rad or > By Side Length
在工作平面的任意位置创建正棱柱体	RPR4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Prism > Hexagonal or > Octagonal or > Pentagonal or > Septagonal or > Square or > Triangular
基于工作平面坐标对创建任意多棱柱体	PRISM	该命令没有相应 GUI 路径
以工作平面原点为中心创建球体	SPHERE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Sphere > By Dimensions
在工作平面的任意位置创建球体	SPH4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Sphere > Hollow Sphere or > Solid Sphere
通过直径的端点生成球体	SPH5	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Sphere > By End Points
以工作平面原点为中心生成圆锥体	CONE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cone > By Dimensions
在工作平面的任意位置创建圆锥体	CON4	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cone > By Picking
生成环体	TORUS	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Torus

图 2-17 所示是环形体素和环形扇区体素。

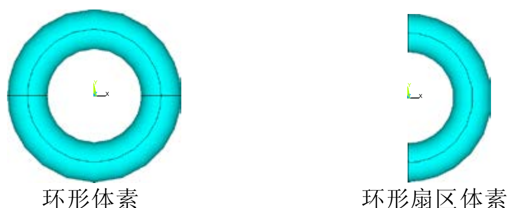


图 2-17 环形体素和环形扇区体素

如图 2-18 所示是空心圆球体素和圆台体素。

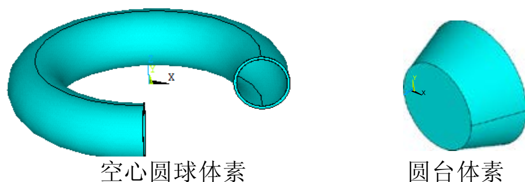


图 2-18 空心圆球体素和圆台体素

2.6 使用布尔操作来修正几何模型

在布尔运算中，对一组数据可用诸如交、并、减等逻辑运算处理，ANSYS 程序也允许对实体模型进行同样的操作，这样修改实体模型就更加容易。

无论是自顶向下还是自底向上构造的实体模型，都可以对它进行布尔运算操作。需注意的是，凡是通过连接生成的图元对布尔运算无效，对退化的图元也不能进行某些布尔运算。通常，完成布尔运算之后，紧接着就是实体模型的加载和单元属性的定义，如果用布尔运算修改了已有的模型，需注意重新进行单元属性和加载的定义。

2.6.1 布尔运算的设置

对两个或多个图元进行布尔运算时，可以通过以下的方式确定是否保留原始图元，如图 2-19 所示。

命令：BOPTN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Settings。

一般来说，对依附于高级图元的低级图元进行布尔运算是允许的，但不能对已划分网格的图元进行布尔操作，必须在执行布尔操作之前将网格清除。

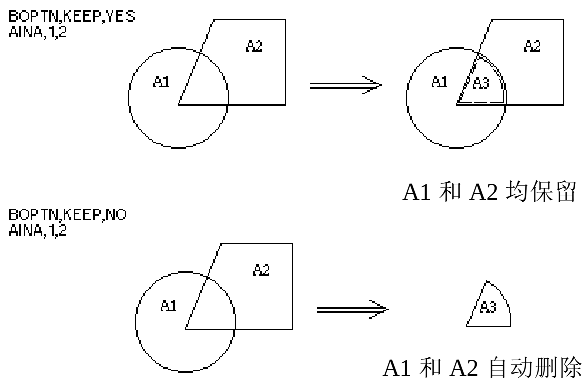


图 2-19 布尔运算的保留操作示例

2.6.2 布尔运算之后的图元编号

ANSYS 的编号程序会对布尔运算输出的图元依据其拓扑结构和几何形状进行编号。例如：面的拓扑信息包括定义的边数，组成面的线数（即三边形面或四边形面），面中的任何原始线（在布尔操作之前存在的线）的线号，任意原始关键点的关键点号等。面的几何信息包括形心的坐标、端点和其他相对于一些任意的参考坐标系的控制点。控制点是由 NURBS 定义的描述模型的参数。

编号程序首先给输出图元分配按其拓扑结构唯一识别的编号（以下一个有效数字开始），任何剩余图元按几何编号。但需注意的是，按几何编号的图元顺序可能会与优化设计的顺序不一致，特别是在多重循环中几何位置发生改变的情况下。

2.6.3 交运算

布尔交运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-19 所示。

表 2-19 交运算

用法	命令	GUI 菜单路径
线相交	LINL	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Common > Lines
面相交	AINA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Common > Areas
体相交	VINV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Common > Volumes
线和面相交	LINA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Line with Area
面和体相交	AINV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Area with Volume
线和体相交	LINV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Line with Volume

图 2-20～图 2-24 所示为一些图元相交的实例。

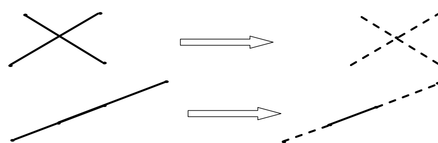


图 2-20 线与线相交

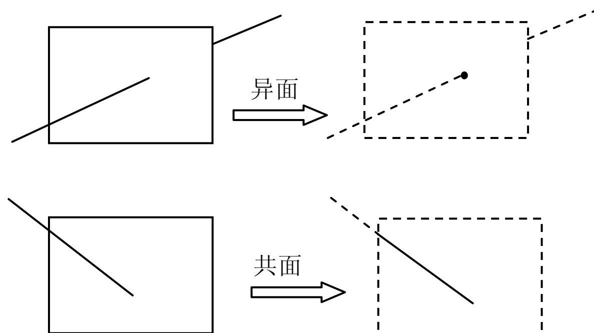


图 2-21 线与面相交

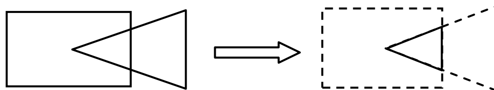


图 2-22 面与面相交

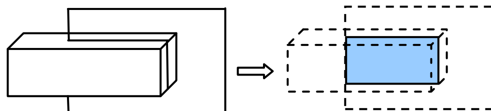


图 2-23 面与体相交

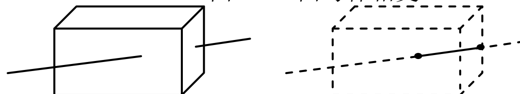


图 2-24 线与体相交

2.6.4 两两相交

两两相交时由图元集叠加而形成的一个新的图元集。就是说，两两相交表示至少任意两个原图元的相交区域。比如，线集的两两相交可能是一个关键点（或关键点的集合），或是一条线（或线的集合）。

布尔两两相交运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-20 所示。

表 2-20 两两相交

用法	命令	GUI 菜单路径
线两两相交	LINP	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Pairwise > Lines
面两两相交	AINP	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Pairwise > Areas
体两两相交	VINP	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > Pairwise > Volumes

图 2-25、图 2-26 所示为一些两两相交的实例。

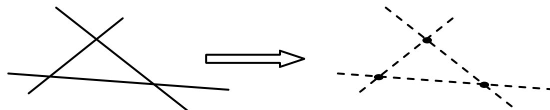


图 2-25 线的两两相交

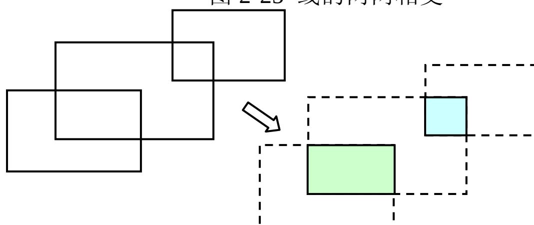


图 2-26 面的两两相交

2.6.5 相加

加运算的结果是得到一个包含各个原始图元所有部分的新图元，这样形成的新图元是一个单一的整体，没有接缝。在 ANSYS 程序中，只能对三维实体或二维共面的面进行加操作，面相加可以包含有面内的孔即内环。

加运算形成的图元在网格划分时通常不如搭接形成的图元。

布尔相加运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-21 所示。

表 2-21 相加运算

用法	命令	GUI 菜单路径
面相加	AADD	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas
体相加	VADD	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes

2.6.6 相减

如果从某个图元（E1）减去另一个图元（E2），其结果可能有两种情况：一种情况是生成一个新图元 E3（E1-E2=E3），E3 和 E1 有同样的维数，且与 E2 无搭接部分；另一种情况是 E1 与 E2 的搭接部分是个低维的实体，其结果是将 E1 分成两个或多个新的实体（E1-E2=E3,E4）。布尔相减运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-22 所示。

表 2-22 相减运算

用法	命令	GUI 菜单路径
线减去线	LSBL	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Lines Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > With Options > Lines Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line by Line Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Line by Line
面减去面	ASBA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Areas Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > With Options > Areas Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Area Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Area by Area
体减去体	VSBV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > With Options > Volumes
线减去面	LSBA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line by Area Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Line by Area
线减去体	LSBV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line by Volume Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Line by Volume
体减去面	ASBV	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Volume Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Area by Volume
面减去线	ASBL[1]	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Line Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Area by Line
体减去面	VSBA	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Volume by Area Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Volume by Area

图 2-27、图 2-28 所示为一些相减的实例。

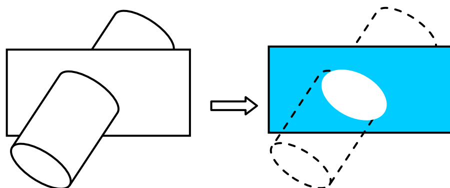


图 2-27　ASBV 面减去体

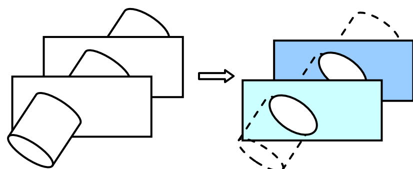


图 2-28　ASBV 多个面减去一个体

2.6.7 利用工作平面作减运算

工作平面可以用来作减运算将一个图元分成两个或多个图元。可以将线、面或体利用命令或相应的 GUI 路径用工作平面去减。对于以下的每个减命令，“SEPO”用来确定生成的图元有公共边界或者独立但恰好重合的边界，“KEEP”用来确定保留或者删除图元，而不管“BOPTN”命令（GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Settings）的设置如何。

利用工作平面进行减运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-23 所示。

表 2-23 减运算

用法	命令	GUI 菜单路径
利用工作平面减去线	LSBW	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Line by WrkPlane Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Line by WrkPlane
利用工作平面减去面	ASBW	Main Menu > Preprocessor > Operate > Divide > Area by WrkPlane Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Area by WrkPlane
利用工作平面减去体	VSBW	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Volu by WrkPlane Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > With Options > Volu by WrkPlane

2.6.8 搭接

搭接命令用于连接两个或多个图元，以生成 3 个或更多新的图元的集合。搭接命令除了在搭接域周围生成了多个边界外，与加运算非常类似。也就是说，搭接操作生成的是多个相对简单的区域，加运算生成一个相对复杂的区域。因而，搭接生成的图元比加运算生成的图元更容易划分网格。

搭接区域必须与原始图元有相同的维数。

布尔搭接运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-24 所示。

表 2-24 搭接运算

用法	命令	GUI 菜单路径
线的搭接	LOVLAP	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Lines
面的搭接	AOVLAP	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Areas
体的搭接	VOVLAP	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Volumes

2.6.9 分割

分割命令用于连接两个或多个图元，以生成 3 个或更多的新图元。如果分割区域与原始图元有相同的维数，那么分割结果与搭接结果相同。但是分割操作与搭接操作不同的是，没有参加分割命令的图元将不被删除。

布尔分割运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-25 所示。

表 2-25 分割运算

用法	命令	GUI 菜单路径
线分割	LPTN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Partition > Lines
面分割	APTN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Partition > Areas
体分割	VPTN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Partition > Volumes

2.6.10 粘接（或合并）

粘接命令与搭接命令类似，只是图元之间仅在公共边界处相关，且公共边界的维数低于原始图元的维数。这些图元之间在执行粘接操作后仍然相互独立，只是在边界上连接。

布尔粘接运算的命令及 GUI 菜单路径如表 2-26 所示。

表 2-26 粘接运算

用法	命令	GUI 菜单路径
线的粘接	LGLUE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Lines
面的粘接	AGLUE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Areas
体的粘接	VGLUE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Volumes

2.7 移动、复制和缩放几何模型

如果模型中的相对复杂的图元重复出现，则仅需对重复部分构造一次，然后在所需

的位置按所需的方位复制生成。例如，在一个平板上开几个细长的孔，只需生成一个孔，然后再复制该孔即可完成，如图 2-29 所示。

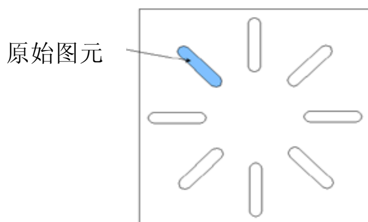


图 2-29 复制面示意图

生成几何体素时，其位置和方向由当前工作平面决定。因为对生成的每一个新体素都重新定义工作平面很不方便，允许体素在错误的位置生成，然后将该体素移动到正确的位置可能使操作更简便。当然，这种操作并不局限于几何体素，任何实体模型图元都可以复制或移动。

对实体图元进行移动和复制的命令由：“xGEN”、“xSYM（M）”和“xTRAN”（相应的有 GUI 路径）。其中“xGEN”和“xTRAN”命令对图元的复制进行移动和旋转可能最为有用。另外需注意，复制一个高级图元将会自动把它所有附带的低级图元都一起复制，而且，如果复制图元的单元（NOELEM=0 或相应的 GUI 路径），则所有的单元及其附属的低级图元都将被复制。在 xGEN、xSYM（M）和 xTRAN 命令中，设置 IMOVE=1 即可实现移动操作。

2.7.1 按照样本生成图元

（1）从关键点的样本生成另外的关键点：

命令：KGEN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints。

（2）从线的样本生成另外的线：

命令：LGEN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Lines。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Lines。

（3）从面的样本生成另外的面：

命令：AGEN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Areas。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Areas > Areas。

（4）从体的样本生成另外的体：

命令：VGEN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volumes。

2.7.2 由对称映像生成图元

（1）生成关键点的映像集：

命令：KSYMM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Keypoints。

（2）样本线通过对称映像生成线：

命令：LSYMM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Lines。

（3）样本面通过对称映像生成面：

命令：ARSYM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas。

（4）样本体通过对称映像生成体：

命令：VSYMM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes。

2.7.3 将样本图元转换坐标系

（1）将样本关键点转到另外一个坐标系：

命令：KTRAN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Keypoints。

（2）将样本线转到另外一个坐标系：

命令：LTRAN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Lines。

（3）将样本面转到另外一个坐标系：

命令：ATRAN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Areas。

（4）将样本体转到另外一个坐标系：

命令：VTRAN。

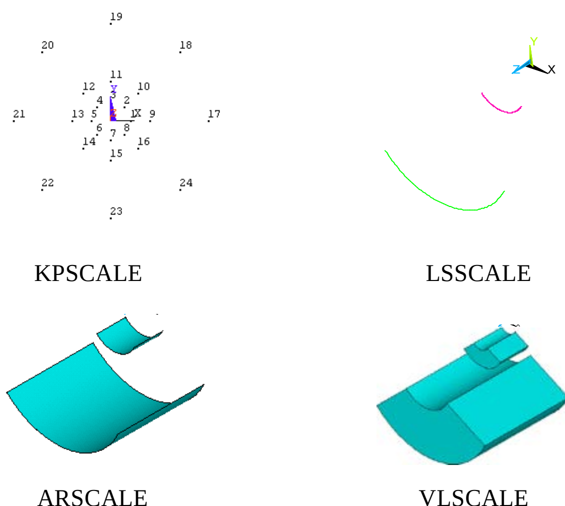
GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Volumes。

2.7.4 实体模型图元的缩放

已定义的图元可以进行放大或缩小。xSCALE 命令族可用来将激活的坐标系下的单个或多个图元进行比例缩放，如图 2-30 所示。

4 个定比例命令每个都是将比例因子用到关键点坐标 X、Y、Z 上。如果是柱坐标系，

X、Y 和 Z 分别代表 R、θ和 Z，其中θ是偏转角，如果是球坐标系，X、Y 和 Z 分别表示 R、θ和φ，其中θ和φ都是偏转角。



KPSCALE　　LSSCALE

ARSCALE　　VLSCALE

图 2-30 给图元定比例缩放

（1）从样本关键点（也划分网格）生成一定比例的关键点：

命令：KPSCALE。

GUI： Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Keypoints。

（2）从样本线生成一定比例的线：

命令：LSSCALE。

GUI： Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Lines。

（3）从样本面生成一定比例的面：

命令：ARSCALE。

GUI： Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Areas。

（4）从样本体生成一定比例的体：

命令：VLSCALE。

GUI： Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Volumes。

2.8 实例导航——导弹发动机药柱建模

2.8.1 自底向上建立药柱模型

由于药柱的模型在横向上的剖面都一样，所以可以采用先建立横向的平面模型再拉伸得到。平面模型根据对称性可以先建立模型的 1/16（如图 2-31 所示），然后通过镜像和复制得到。

01 定义截面上的关键点。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS，弹出如图 2-32 所示的对话框，按照图示输入关键点 1（0，0.193，0）的坐标值，用同样的方法依次输入关键点 2（0，0.119，0）、关键点 3（0，0.050，0）、关键点 4（0.0125，0.119，0）和关键点 5（0.0125，0，0）。再转换激活的坐标系为柱坐标系（如图 2-33 所示），用同样的方法再创建关键点 6（0.197，67.5，0）和关键点 7（0.050，67.5，0），创建完关键点后将坐标系仍然转换到默认的笛卡尔坐标系。需要注意的是，ANSYS 对单位没有严格的区分，原则上建议读者按照国际单位转换输入，避免之后复杂的单位制转换。

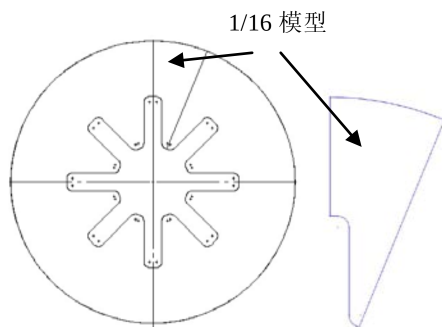


图 2-31 药柱模型

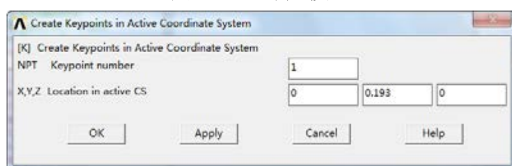


图 2-32 关键点输入

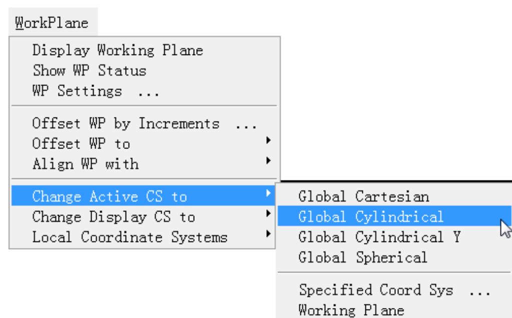


图 2-33 转换坐标系

02 由关键点创建线。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord，在屏幕上分别单击关键点 1 和 2，将连接成线 1，依次将关键点 2 和 4，关键点 4 和 5，关键点 6 和 7 连接成线。下一步将创建圆弧，可以采用笛卡尔坐标系中的创建圆弧命令，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord，在这里采用了另外的方式，即在柱坐标系中创建线（该线也就是圆弧）。

因此首先将笛卡尔坐标系转换为柱坐标系，采用图 2-33 的方法，依次连接关键点 6 和 1、关键点 3 和 7，操作完成之后记得再将坐标系改为笛卡尔坐标系。为了能确切地显示各关键点和线的编号，需要执行以下操作，PlotCtrls > Numbering，在弹出的对话框中按照如图 2-34 所示选择，创建线之后的图形如图 2-35 所示。

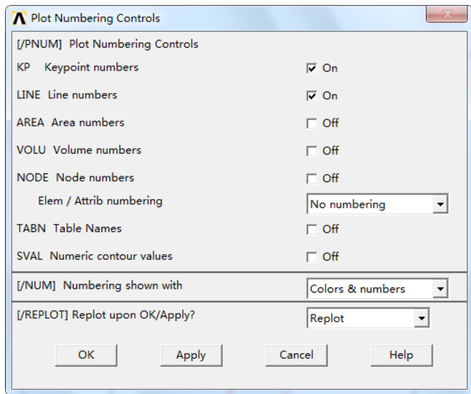


图 2-34　编号显示设置

图 2-35 所示跟实际的截面模型已经相差不大了，接下来需要将多余的线删除，以及在部分地方创建圆角。之前已经学过了删除线的方法，但是该方法将会把整条线给删除掉。而需要删除的线的部分仍然依附在整条线上，所以要首先对该线进行搭接处理，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Overlap > Lines。分别选择线 3 和 6，单击“OK”按钮，操作完成后如图 2-36 所示。可以发现之前的线 3 和线 6 经过搭接操作后变成了线 7、8、9、10。之后对线 7、9 进行删除操作，就可以得到想要的图形了。删除操作的 GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Lines Only，分别选择线 7 和 9，单击“OK”按钮，操作完成后如图 2-37 所示。

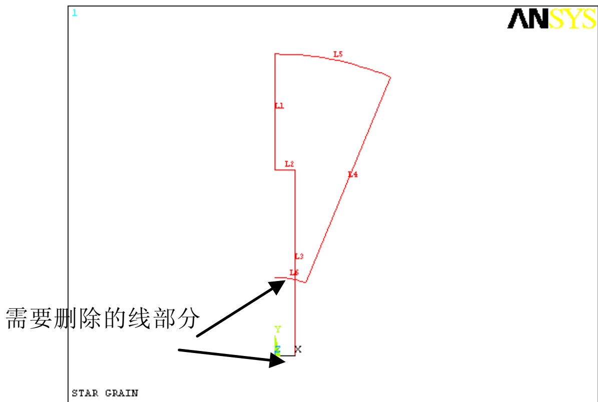


图 2-35 创建线之后图形界面

接下来对线 2 和 8，以及线 8 和 10 进行倒圆角操作，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Line Fillet。单击线 2 和 8，在弹出的对话框输入半径为 0.0075，如图 2-38 所示。用同样的操作对在线 8 和 10 之间倒一个半径为 0.0075 的圆角，这样药柱横截面的边界图形就已经形成了，如图 2-39 所示。

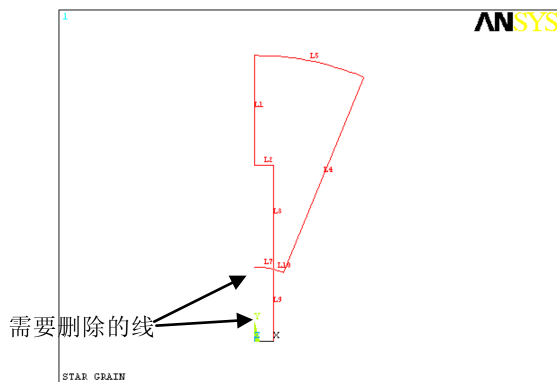


图 2-36　线搭接之后图形

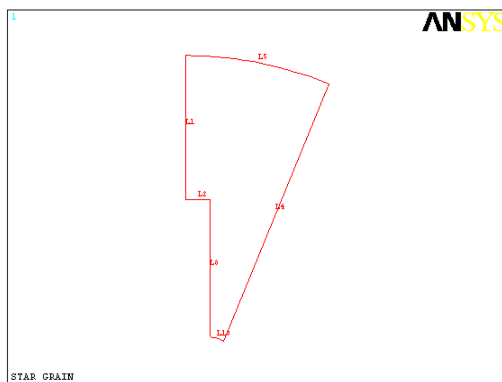


图 2-37　线删除之后图形

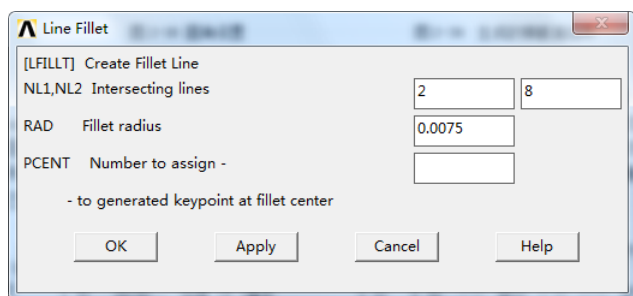


图 2-38 圆角设置

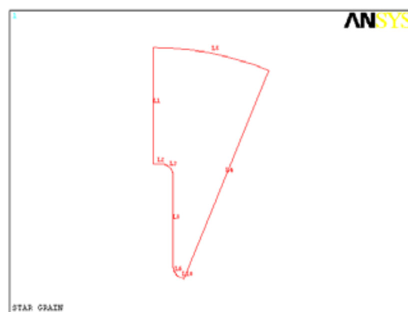


图 2-39　生成的横截面边界

03 由线创建面。目前得到的图形仅仅只是由线构成的，需要对这些线进行生成面的操作，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines，在弹出的图 2-40 所示的对话框中，选中“Loop”选项，再任意选择一条线，ANSYS 将自动选择该线所在的一条封闭环，单击“OK”按钮即生成了一个面，如图 2-41 所示，至此药柱的横截面已经形成。

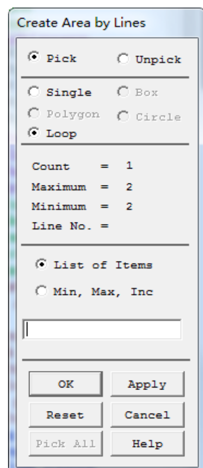


图 2-40 选择一组封闭线设置

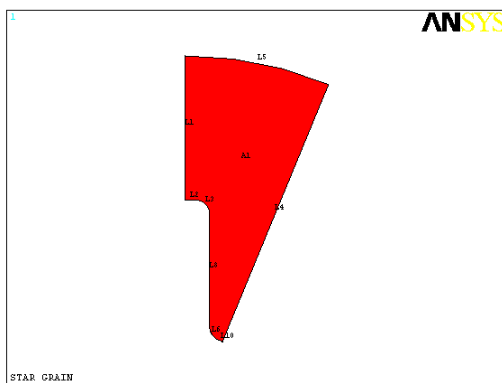


图 2-41 生成的面

04 由面创建体。前面已经说过，该药柱可以通过横截面拉伸直接得到，因此首先需要确定拉伸的方向，为此要重新创建一条拉伸路径。用前面的方法先创建两个关键点（0，0，0）和（0，0，1），连接这两个关键点得到线 7 作为拉伸的路径。拉伸的 GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Operate > Extrude > Along Lines，在弹出的对话框中先选择面 1，单击“OK”按钮后，再选择刚刚生成的线 7，单击“OK”按钮后，将生成一个体。之后将临时形成的线 7 删除掉，至此药柱的模型已经完全生成，如图 2-42 所示。利用模型的对称性，可以将该 1/16 模型作为后续分析的原始模型。

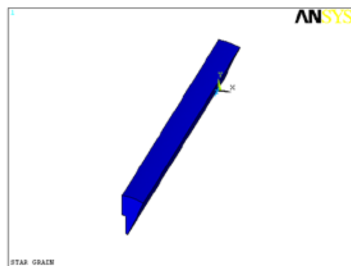


图 2-42 拉伸生成体

```
生成 1/16 模型的命令流：
/CLEAR
/FILENAME,GRAIN,1
/TITLE,STAR GRAIN
/PREP7
!定义变量名称
!以下定义药柱模型尺寸
R3=0.193                !绝热层内半径（药柱外半径）
HCAO=0.119              !柱段内孔直径
WCAO=0.0125             !翼槽宽度
R4=0.050                !翼槽高度
RCAO_TOP=0.0075         !翼尖倒圆
RCAO_ROOT=0.0075        !翼根倒圆
!建立模型
K,1,0,R3,
K,2,0,HCAO
K,3,0,R4
K,4,WCAO,HCAO
K,5,WCAO,0
CSYS,1
K,6,R3,67.5,
K,7,R4,67.5
CSYS,0
L,1,2
L,2,4
L,4,5
```

```
L,6,7
CSYS,1
L,1,6
L,3,7
CSYS,0
/PNUM,LINE,1
LOVLAP,3,6
LDELE,7
LDELE,9
LFILLT,2,8,RCAO_TOP
LFILLT,8,10,RCAO_ROOT
AL,ALL
!建立拉伸路径
K,100
K,101,0,0,1
L,100,101                    !线 7
!拉伸面成体
VDRAG,1,,,,,,7
LDELE,7
NUMCMP,ALL
/PNUM,LINE
/PNUM,VOLU,1
VPLOT,ALL
```

05 生成全药柱模型。为了熟悉镜像和复制操作，在此基础上对其进行镜像和复制。首先作镜像，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes。选择刚刚生成的体 1，单击“OK”按钮，在弹出的对话框将镜像面设置成 Y-Z 平面，如图 2-43 所示，单击“OK”按钮后，生成的图形如图 2-44 所示。然后再将生成的两个体作复制操作，因为是沿着周向均布成 8 个，所以需要重新转换为柱坐标系，再作复制操作。复制的 GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes 或 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volumes，选择体 1，体 2，单击“OK”按钮，在弹出的对话框设置成图 2-45 所示，即沿环向偏移 45º 角均步 8 个，单击“OK”按钮后，最终生成的了全药柱模型，如图 2-46 所示。

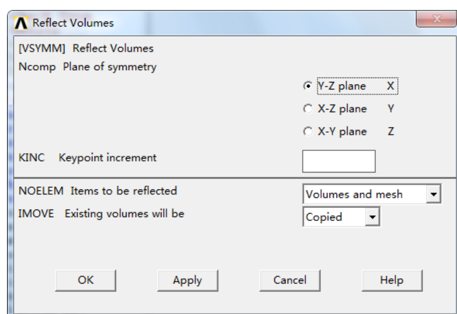


图 2-43 镜像设置

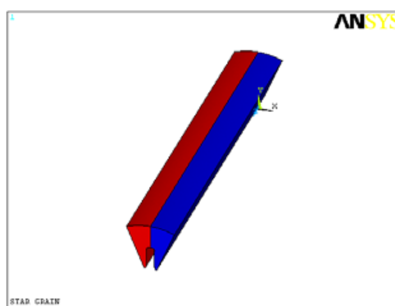


图 2-44 镜像后的图形

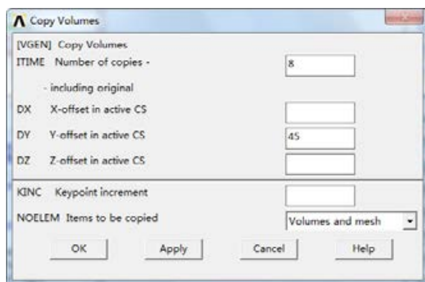


图 2-45 复制设置

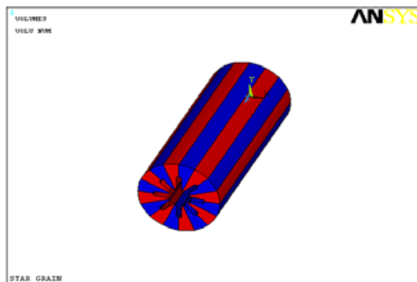


图 2-46 复制后的图形

ANSYS 对图形的旋转和拖放操作可以通过工具条的“Dynamic Model Mode”按钮实现，当该按钮被激活时，按住鼠标左键可以平移模型，按住鼠标右键可以自由地旋转模型，大大方便了对模型的操作。

2.8.2 布尔操作建立药柱模型

该药柱模型可以通过两个实体进行布尔减操作来生成，如图 2-47 所示。

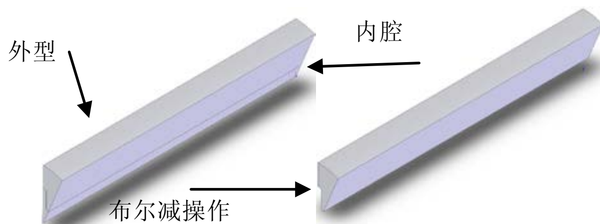


图 2-47 布尔减操作后的药柱

01 自顶向下方式生成药柱外型。由于外型为圆柱体的 1/16，我们采用自顶向下的方式生成，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > by Dimensions，设置如图 2-48 所示。其中“Outer radius”表示外半径，“Optional inner radius”表示内半径，为 0 时表示为圆柱体“Z-coordinates”表示圆柱两个端面的 Z 坐标，“Starting angle”表示起始角度，“Ending angle”表示终止角度。单击“OK”按钮后将生成如图 2-49 所示的图形。

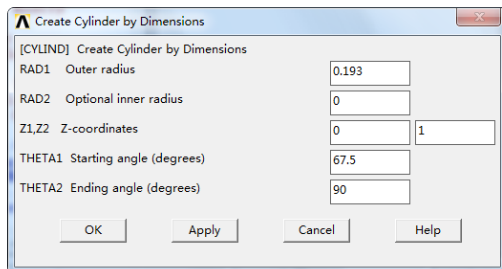


图 2-48 生成圆柱设置

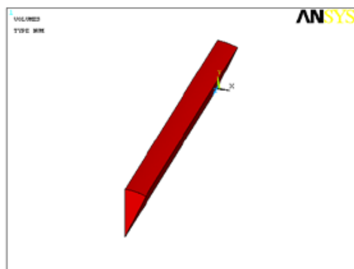


图 2-49 生成的圆柱

02 自底向上方式生成药柱内腔。具体方法可参考前面章节，即先生成关键点，然后由关键点生成线，再由线围成面，最后面通过拉伸成体，生成的内腔如图 2-50 所示。

03 布尔减操作生成药柱模型。将上述生成的两个体做布尔减操作，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes 或 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > With Options > Volumes，在弹出的对话框中先选择外型体，单击“OK”按钮，然后再选择内腔体，单击“OK”按钮，即生成了如图 2-51 所示的图形，至此通过布尔操作生成的药柱已经完成。

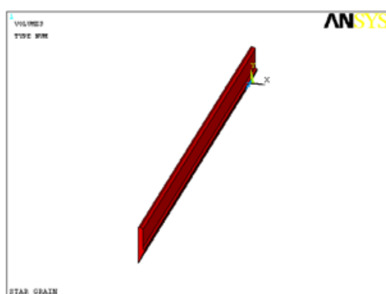


图 2-50 生成的内腔

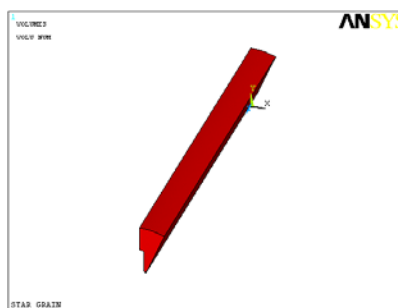


图 2-51 布尔减操作

布尔减操作生成药柱模型的命令流：

```
/CLEAR
/FILENAME,GRAIN,1
/TITLE,STAR GRAIN
/PREP7
!定义变量名称
!以下定义药柱模型尺寸
R3=0.193                !绝热层内半径（药柱外半径）
HCAO=0.119              !柱段内孔直径
WCAO=0.0125             !翼槽宽度
R4=0.050                !翼槽高度
RCAO_TOP=0.0075         !翼尖倒圆
RCAO_ROOT=0.0075        !翼根倒圆
!建立模型
K,1,0,0
K,2,0,HCAO
K,3,WCAO,HCAO
K,4,WCAO,0
K,5,0,R4
CSYS,1
K,6,R4,67.5,
CSYS,0
L,1,2
L,2,3
```

```
L,4,3
L,6,1
CSYS,1
L,5,6
CSYS,0
LOVLAP,3,5
LDELE,7
LDELE,8
LFILLT,2,6,RCAO_TOP
LFILLT,6,9,RCAO_ROOT
AL,ALL
K,,0,0,1
!建立拉伸路径
L,1,12                              !线 7
!拉伸成体
VDRAG,1,,,,,,7
!建立外型
CYLIND,0,R3,0,1,67.5,90
/PNUM,VOLU,1
!布尔减操作
VSBV,2,1
VPLOT,ALL
```

2.8.3 导入SolidWorks中创建的药柱模型

前面提到了 ANSYS 中的几何模型还可以从 CAD 软件生成的模型导入，从而减少在 ANSYS 中的建模工作量。在这里，采用了在 SolidWorks 中建立药柱模型，然后导入到 ANSYS 中。

01 在 SolidWorks 中创建零件模型。由于 SolidWorks 是当今比较流行的实体造型三维绘图软件，对实体造型提供了很好的支持，所以先在 SolidWorks 中绘制药柱模型，具体过程可参考 SolidWorks 的相关帮助文件，得到如图 2-52 所示的零件文件。然后另存为“parasolid”文件（后缀名为*.x_t），假设文件名为“grain.x_t”，需要注意的是该文件名不要带汉字，否则导入到 ANSYS 时会出错。



图 2-52　SolidWorks 中绘制的药柱零件文件

02 将模型文件导入到 ANSYS。将 SolidWorks 中生成的“grain.x_t”导入到 ANSYS

的 GUI 操作：File > Import > PARA，在弹出的对话框找到该文件的完整路径，单击“OK”按钮，就可以看见如图 2-53 所示的图形了。可以看见该图形的显示方式跟之前在 ANSYS 建模生成的不大一样，需要对其作如下设置，GUI 操作：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets，在弹出的对话框中将显示方式设置为“Normal Faceting”，设置后的显示如图 2-54 所示。

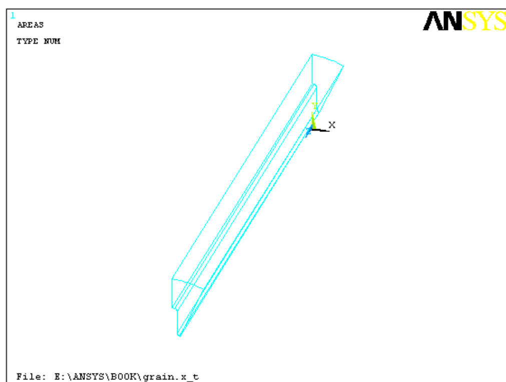


图 2-53 导入到 ANSYS 中的模型文件

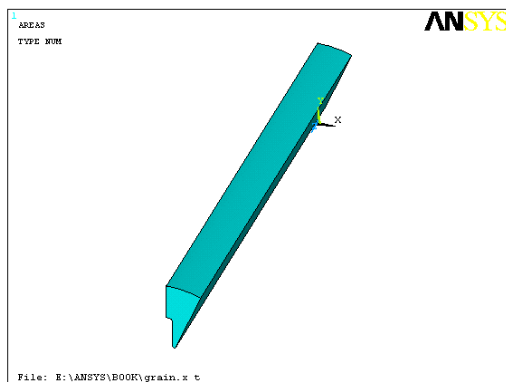


图 2-54 重新设置显示方式的模型文件

方法三完整的命令流格式：

```
/CLEAR
/FILENAME,GRAIN,1
/TITLE,STAR GRAIN
/PREP7
~PARAIN,GRAIN,,E:\ANSYS\book    !假设该模型文件的路径为 E:\ANSYS\book\Grain.x_t
/FACET
```

第 3 章

建模实例

本章以实例的形式介绍建立有限元模型的两种方法：输入法和创建法。其中创建法可以自顶向下，也可以自底向上。

通过本章学习，帮助读者进一步掌握 ANSYS 建模的基本方法和技巧。

学习要点

- 几何模型的输入实例
- 对输入模型修改实例
- 自主建模实例

3.1 实例导航——几何模型的输入

建立有限元模型有两种方法：输入法和创建法。输入法是直接输入由其他 CAD 软件创建好的实体模型，创建法是在 ANSYS 中从无到有地创建实体模型。两者并不是完全分开的。

3.1.1 输入IGES单一实体

01 清除 ANSYS 的数据库。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Clear & Start New…

❷在打开的“Clear Database and Start New ”对话框中，选择“Read file”，单击“OK”按钮，如图 3-1 所示。

❸打开确认对话框，单击“Yes”按钮，如图 3-2 所示。

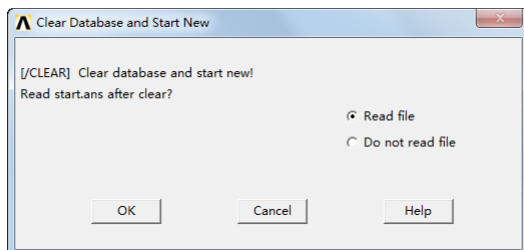


图 3-1 建立新的文件

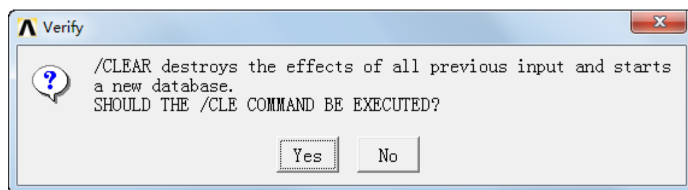


图 3-2 建立新文件的确认对话框

02 改作业名为“actuator”。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…

❷打开“Change Jobname”对话框，在文本框中键入“actuator”作为新的作业名，然后单击“OK”按钮，如图 3-3 所示。

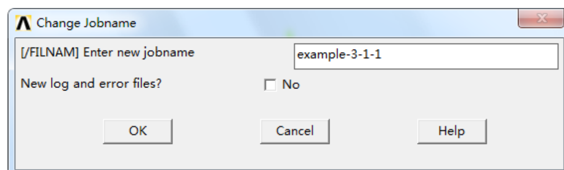


图 3-3 设置新的工作名

03 用默认的设置输入“actuator.iges”IGES 文件。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > Iges…。

❷在打开的“Import IGES File”对话框中，选择导入的参数，然后单击“OK”按钮，如图 3-4 所示。

❸打开“Import IGES File”对话框，选择“Browse”按钮，如图 3-5 所示。

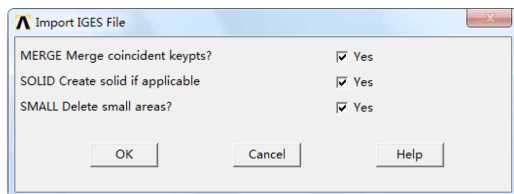


图 3-4 选择导入参数

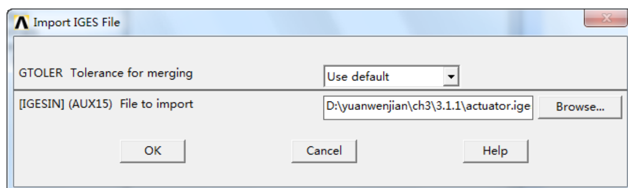


图 3-5 选择“Browse”按钮

❹在浏览对话框“File to import”中，选择“actuator.iges”，然后单击“打开”按钮，如图 3-6 所示。

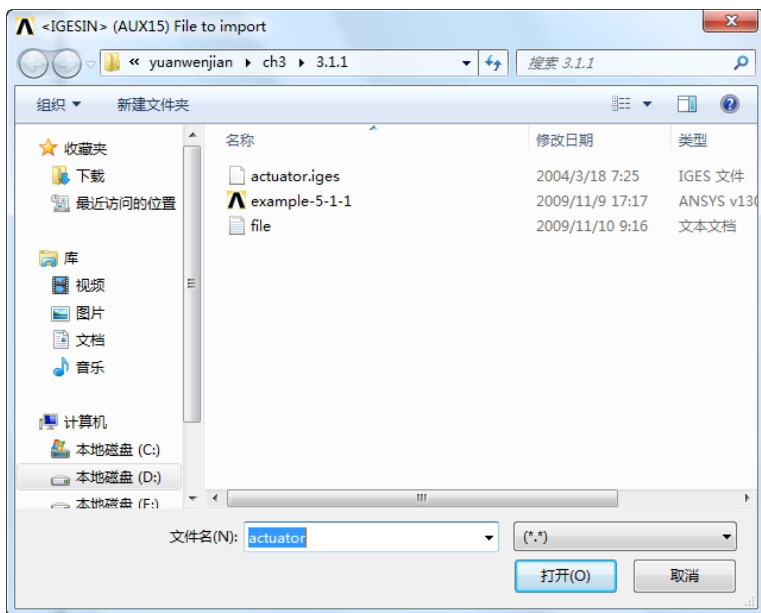


图 3-6 选择 actuator.iges

❺这样会得到输入模型后的结果，如图 3-7 所示。

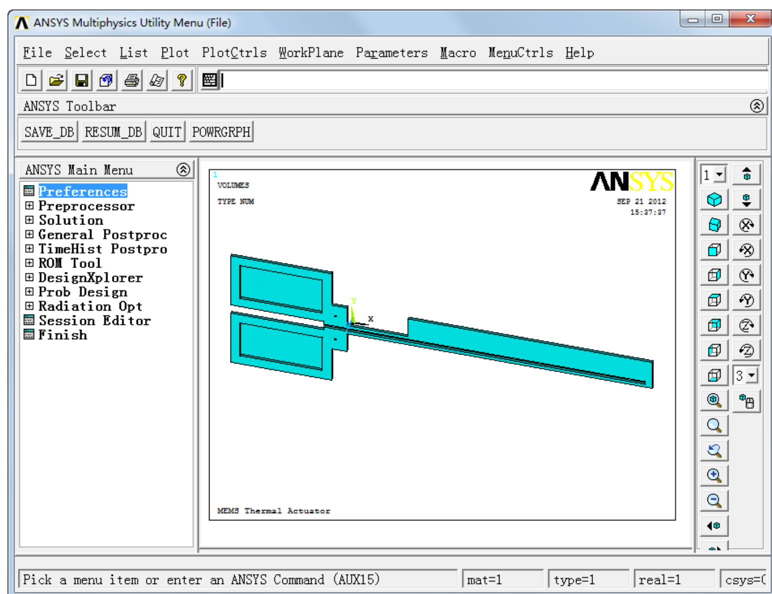


图 3-7 输入 IGES 文件后的结果

04 保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮。

本例操作的命令流如下：

```
/CLEAR
! 清除 ANSYS 的数据库
/FILNAME,actuator,0
! 改作业名为“actuator”
/AUX15
!进入导入“IGES”模式
IGESIN,'actuator','iges',' '
!假设该模型位置在 ANSYS 的默认目录。
VPLOT
SAVE
! 保存数据库
FINISH
```

3.1.2 输入SAT 单一实体

01 清除 ANSYS 的数据库。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Clear & Start New…。

❷在打开的“Clear Database and Start New” 对话框中，选择“Read file”，单击“OK”按钮，如图 3-8 所示。

❸打开确认对话框，单击“Yes”按钮，如图 3-9 所示。

02 改作业名为“bracket”。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…

❷打开“Change Jobname”对话框，在文本框中键入“bracket” 作为新的作业名，然后单击“OK”按钮，如图 3-10 所示。

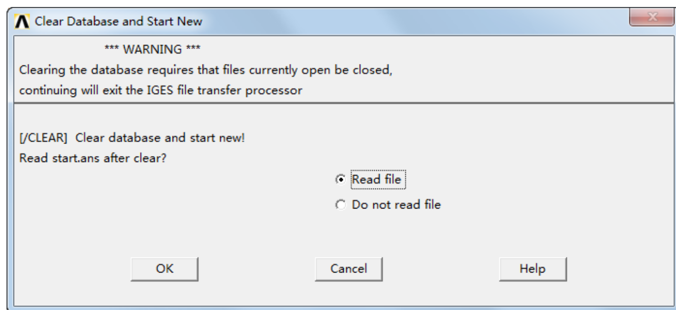


图 3-8 建立新的文件

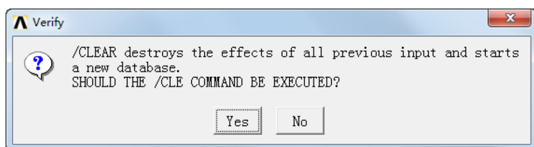


图 3-9 建立新文件的确认对话框

03 输入“bracket.sat”SAT 文件。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…，如图 3-11 所示。

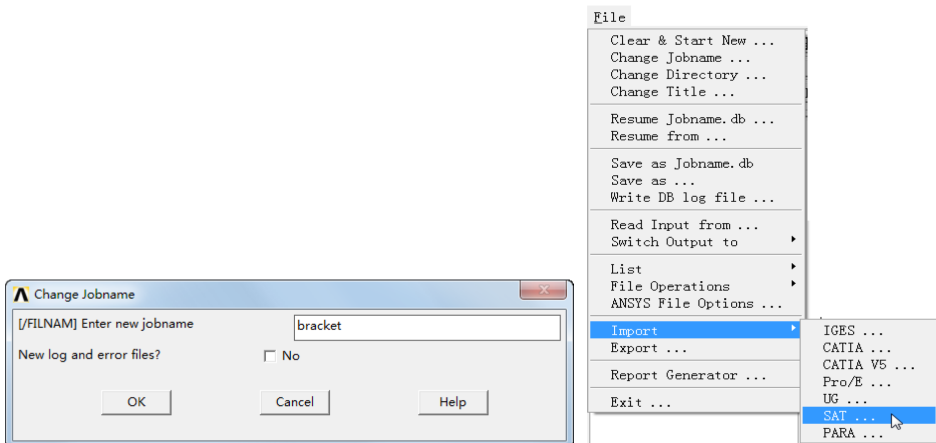


图 3-10 设置新的工作名　　　　图 3-11 输入 SAT 文件

❷在打开的文件对话框中选择“bracket.sat”SAT 文件，然后单击“OK”按钮，如图 3-12 所示。

04 打开“Normal Faceting”。

❶选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets…

❷在打开的对话框中，在下拉列表中选择“Normal Faceting”，然后单击“OK”按钮，如图 3-13 所示。

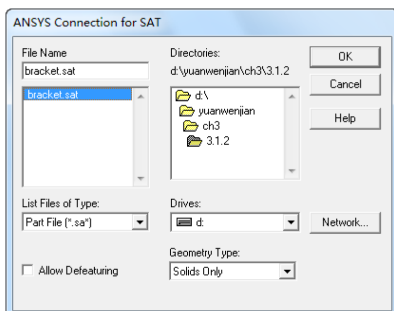


图 3-12 选择 SAT 文件

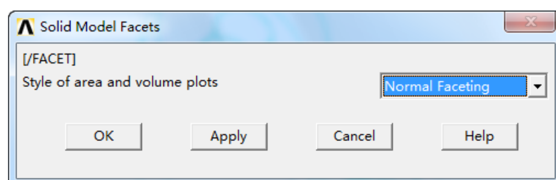


图 3-13 打开 Normal Faceting

❸选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Replot

05 保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮。得到如图 3-14 所示的结果。

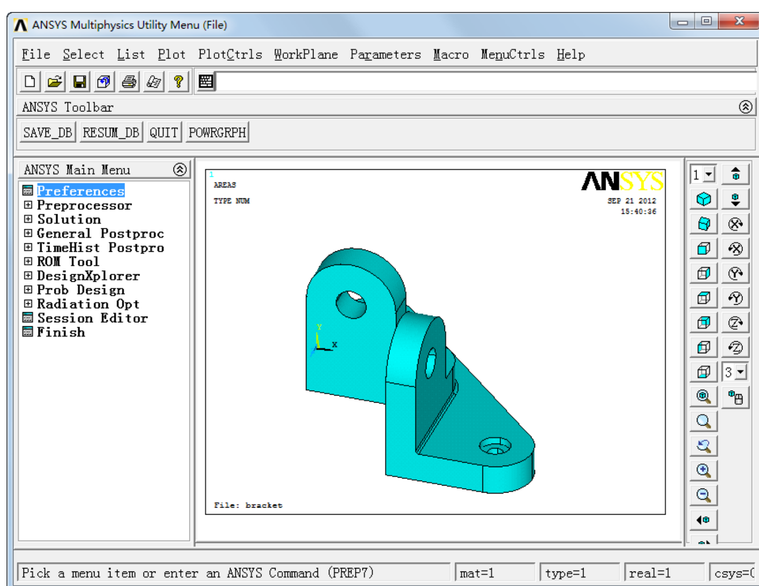


图 3-14 输入 SAT 文件后的结果

本例操作的命令流如下：

```
/CLEAR
! 清除 ANSYS 的数据库
/FILNAME,bracket,0
! 改作业名为“bracket”
~SATIN,'E:\ANSYS\yuanwenjian\bracket','sat',,SOLIDS,0
!假设该模型文件的路径为“E:\ANSYS\yuanwenjian\bracket”
/FACET,NORML
! 打开“Normal Faceting”
/REPLOT
SAVE
! 保存数据库
FINISH
```

3.1.3 输入SAT实体集合

存在两种方式在 ANSYS 中输入 SAT 集合，直接输入 SAT 集合和分别输入集合中的部件以在 ANSYS 中形成集合。

01 在 ANSYS 程序中直接输入 SAT 集合。

❶清除 ANSYS 的数据库。

①选择实用菜单 Utility Menu： File > Clear & Start New…。

②在打开的“Clear Database and Start New” 对话框中，选择“read file”，单击“OK”按钮。

③这里会打开确认对话框，单击“Yes”按钮。

❷改作业名为“bracket-assy”。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…

②打开“Change Jobname”对话框，在文本框中键入“bracket-assy”作为新的作业名，然后单击“OK”按钮。

❸输入“bracket-assy.sat”SAT 文件。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…，如图 3-15 所示。

②在打开文件对话框中选择“bracket-assy.sat”SAT 文件，然后单击“OK”按钮，如图 3-16 所示。

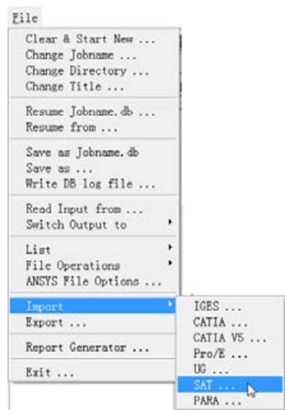


图 3-15 输入 SAT 文件

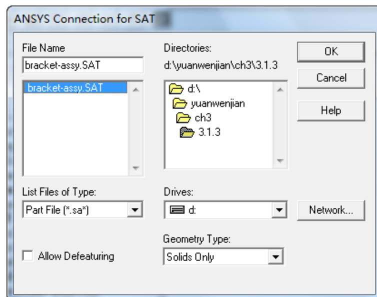


图 3-16 选择 SAT 文件

❹打开“Normal Faceting”。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets…

②在打开的对话框中，在下拉列表中选择“Normal Faceting”，然后单击“OK”按钮，如图 3-17 所示。

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Replot。

❺打开实体编号开关。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Numbering…

②在打开的对话框中，将实体编号开关设为“on”，然后单击“OK”按钮，如图 5-18 所示。

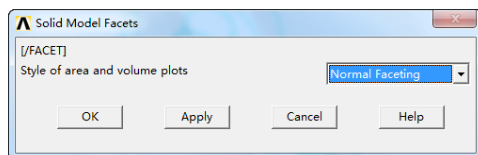


图 3-17 打开 Normal Faceting

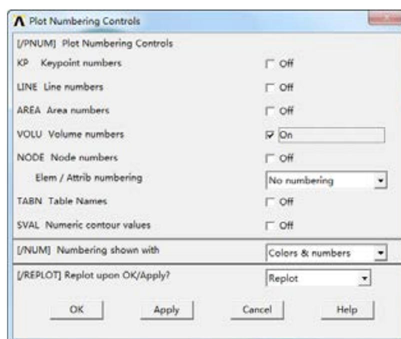


图 3-18 打开实体编号开关

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Volumes。

❻保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮，得到如图 3-19 所示的结果。

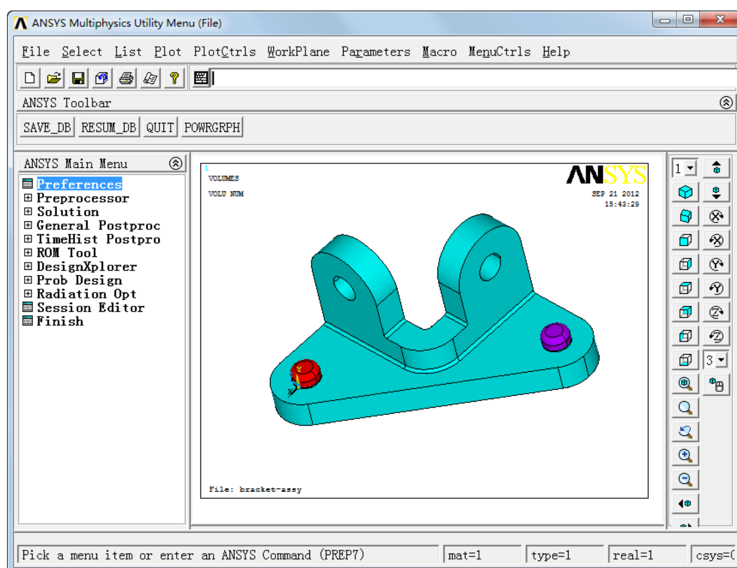


图 3-19 输入 SAT 文件后的结果

本例操作的命令流如下：

```
/CLEAR,START
! 清除 ANSYS 的数据库
/FILNAME,bracket-assy,0
! 改作业名为“bracket-assy”
~SATIN,'bracket-assy','SAT',,SOLIDS,0
/NOPR
/GO
! 输入“bracket-assy.sat”SAT 文件
/FACET,NORML
!打开“Normal Faceting”
```

```
/REPLOT
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,0
/PNUM,VOLU,1
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,0
! 打开实体编号开关
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
APLOT
/USER,   1
/VIEW,   1,   0.325584783540     ,   0.427291295398     , -0.843455213751
/ANG,    1,    28.6630259312
/REPLO
/VIEW,   1, -0.471868259238     ,   0.773098564555     , -0.423861953243
/ANG,    1,    63.6877547685
/REPLO
/VIEW,   1, -0.233241627568E-01,   0.684391826561     , -0.728741251178
/ANG,    1,    28.9946859905
/REPLO
/VIEW,   1,   0.245150571720     ,   0.800288431897     , -0.547210766485
/ANG,    1,    8.86560730138
/REPLO
VPLOT
/REPLOT,RESIZE
SAVE
! 保存数据库
FINISH
```

02 在 ANSYS 程序中输入单个 SAT 文件来组成 SAT 集合。

❶清除 ANSYS 的数据库。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Clear & Start New…

②在打开的“Clear Database and Start New” 对话框中，选择“read file”，单击“OK”按钮。

③打开确认对话框，单击“Yes”按钮。

❷改作业名为“bracket-2”。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…

②打开“Change Jobname”对话框，在文本框中键入“bracket-2”作为新的作业名，然后单击“OK”按钮。

❸输入单个的 SAT 文件来组成 SAT 集合。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…。

②在打开文件对话框中选择“bracket.sat”SAT 文件，然后单击“OK”按钮。

③选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…。

④在打开文件对话框中选择“axi1.sat”SAT 文件，然后单击“OK”按钮。

⑤选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…。

⑥在打开文件对话框中选择“axi2.sat”SAT 文件，然后单击“OK”按钮。

❹打开“Normal Faceting”。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets…。

②在打开的对话框中，在下拉列表中选择“Normal Faceting”，然后单击“OK”按钮。

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Replot。

❺打开实体编号开关。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Numbering…。

②在打开的对话框中，将实体编号开关设为“on”，然后单击“OK”按钮。

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Volumes。

❻保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮，得到如图 3-20 所示的结果。

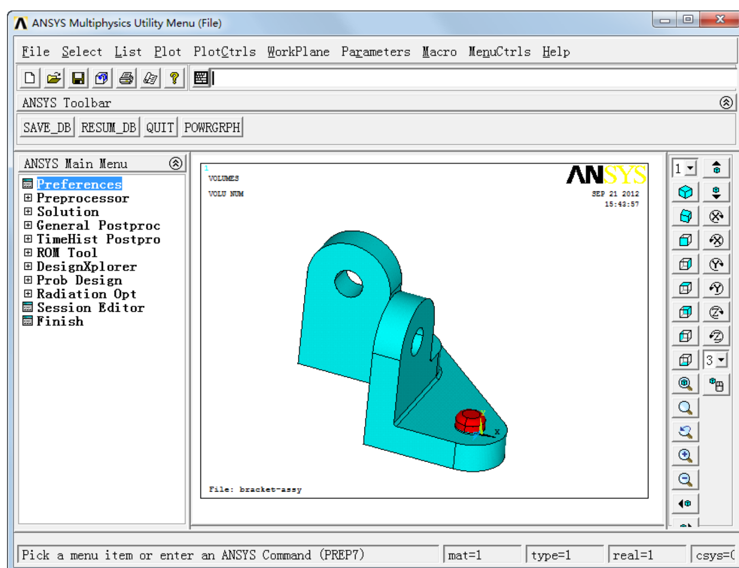


图 3-20 输入 SAT 文件后的结果

3.1.4 输入Parasolid 单一实体

01 清除 ANSYS 的数据库。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Clear & Start New…。

❷在打开的“Clear Database and Start New” 对话框中，选择“read file”，单击“OK”

按钮。

❸打开确认对话框，单击“Yes”按钮。

02 改作业名为“replace”。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…。

❷打开“Change Jobname”对话框，在文本框中键入“replace”作为新的作业名，然后单击“OK”按钮。

03 输入“replace.x_t”实体参数文件。

❶选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > PARA…，如图 3-21 所示。

❷在打开文件对话框中选择“replace.x_t”文件，然后单击“OK”按钮，如图 3-22 所示。

04 打开“Normal Faceting”。

❶选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets…。

❷在打开的对话框中，在下拉列表中选择“Normal Faceting”，然后单击“OK”按钮，如图 3-23 所示。

❸选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Replot。

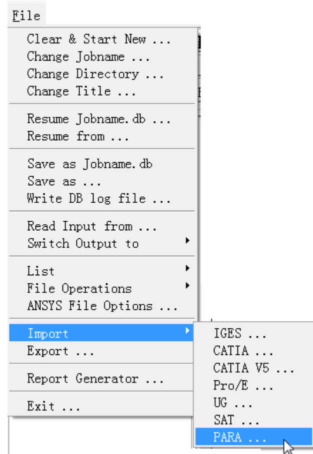


图 3-21 输入 PARA 文件

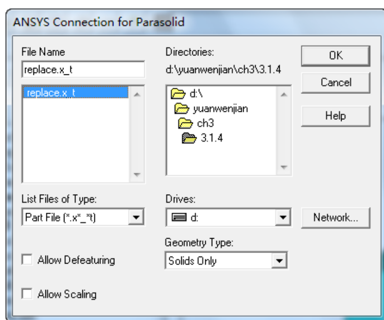


图 3-22 选择文件

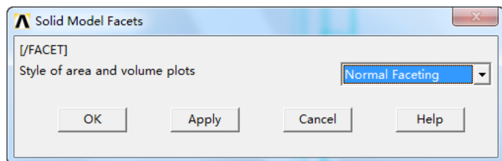


图 3-23 打开“Normal Faceting”

05 保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮，得到如图 3-24 所示的结果。

本例操作的命令流如下：

```
/CLEAR,START
! 清除 ANSYS 的数据库
/FILNAME,replace,0
! 改作业名为“replace”
```

```
~PARAIN,'replace','x_t',,SOLIDS,0,0
! 输入“replace.x_t”实体参数文件
```

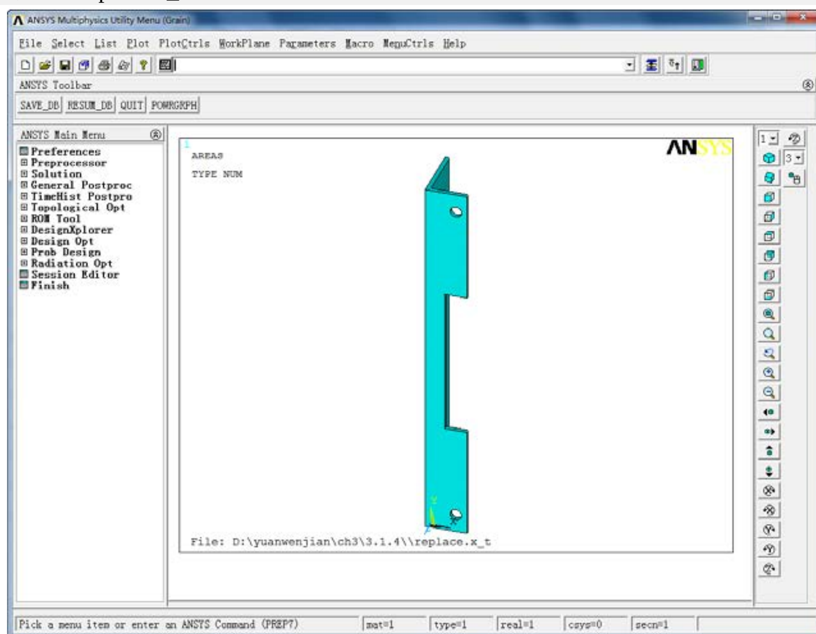


图 3-24 输入 SAT 文件后的结果

```
/NOPR
/GO
/FACET,NORML
! 打开“Normal Faceting”
/REPLOT
/USER,   1
/VIEW,   1,   0.839796772209      , -0.234843988588      , -0.489478990776
/ANG,    1,   -24.4882476303
/REPLO
/REPLOT,RESIZE
SAVE
FINISH
! 保存数据库
```

3.1.5 输入Parasolid实体集合

存在两种方式在 ANSYS 中输入 Parasolid 集合：直接输入 Parasolid 集合和分别输入集合中的部件以在 ANSYS 中形成集合。

01 在 ANSYS 程序中直接输入 Parasolid 集合。

❶清除 ANSYS 的数据库。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Clear & Start New…。

②在打开的“Clear Database and Start New” 对话框中，选择“read file”，单击“OK”

按钮。

③这里会打开确认对话框，单击“Yes”按钮。

❷改作业名为“replace-assy”。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…。

②打开“Change Jobname”对话框，在文本框中输入“replace-assy”作为新的作业名，然后单击“OK”按钮。

❸输入“replace-assy.x_t”实体参数文件。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > PARA…，如图 3-25 所示。

②在打开文件对话框中选择“replace-assy.x_t”文件，然后单击“OK”按钮，如图 3-26 所示。

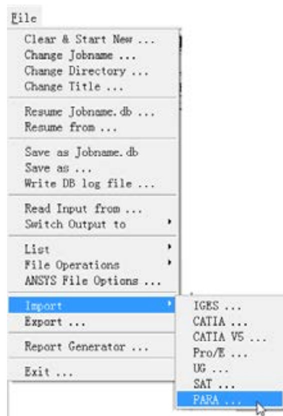


图 3-25 输入 PARA 文件

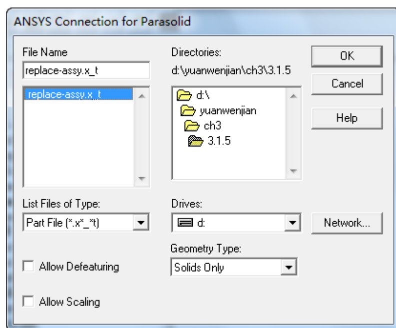


图 3-26 选择文件

❹打开“Normal Faceting”。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets…。

②在打开的对话框中，在下拉列表中选择“Normal Faceting”，然后单击“OK”按钮，如图 3-27 所示。

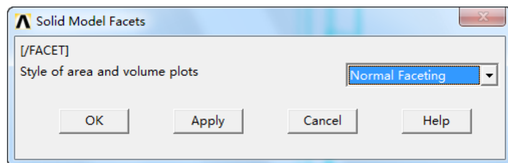


图 3-27 打开“Normal Faceting”

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Replot。

❺保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮。得到如图 3-28 所示的结果。

02 在 ANSYS 程序中分别输入单个的 Parasolid 文件来组成 Parasolid 集合。

❶清除 ANSYS 的数据库。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Clear & Start New…。

②在打开的“Clear Database and Start New” 对话框中，选择“read file”，单击“OK”按钮。

③打开确认对话框，单击“Yes”按钮。

❷改作业名为“replace-2”。

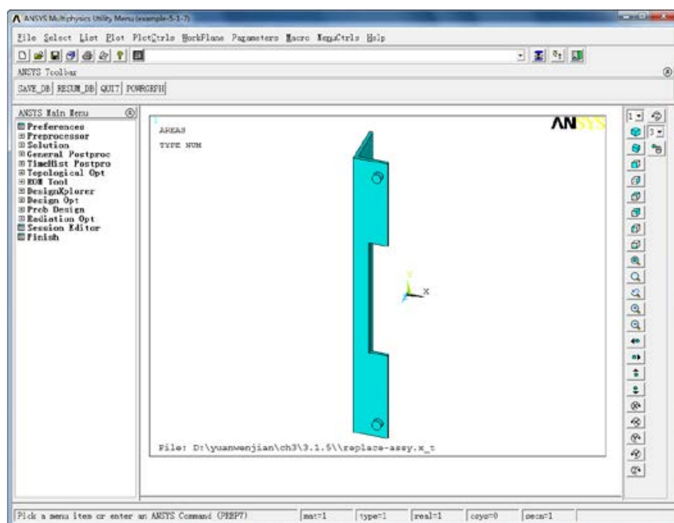


图 3-28 输入 Parasolid 文件后的结果

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Change Jobname…。

②打开“Change Jobname”对话框，在文本框中输入“replace-2”作为新的作业名，然后单击“OK”按钮。

❸输入单个的 Parasolid 文件来组成 Parasolid 集合。

①选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…。

②在打开文件对话框中选择“replace.x_t” Parasolid 文件，然后单击“OK”按钮。

③选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…。

④在打开文件对话框中选择“axi1.x_t” Parasolid 文件，然后单击“OK”按钮。

⑤选择实用菜单 Utility Menu：File > Import > SAT…。

⑥在打开文件对话框中选择“axi2.x_t” Parasolid 文件，然后单击“OK”按钮。

❹打开“Normal Faceting”。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Style > Solid Model Facets…。

②在打开的对话框中，在下拉列表中选择“Normal Faceting”，然后单击“OK”按钮。

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Replot。

❺打开实体编号开关。

①选择实用菜单 Utility Menu：PlotCtrls > Numbering…。

②在打开的对话框中，将实体编号开关将实体编号开关设为“on”，然后单击“OK”按钮。

③选择实用菜单 Utility Menu：Plot > Volumes。

❻保存数据库。在工具条上单击“SAVE_DB”按钮，得到如图 3-29 所示的结果。

本例操作的命令流如下：

```
/CLEAR,START
```

```
!清除 ANSYS 的数据库
/FILNAME,replace-assy,0
```

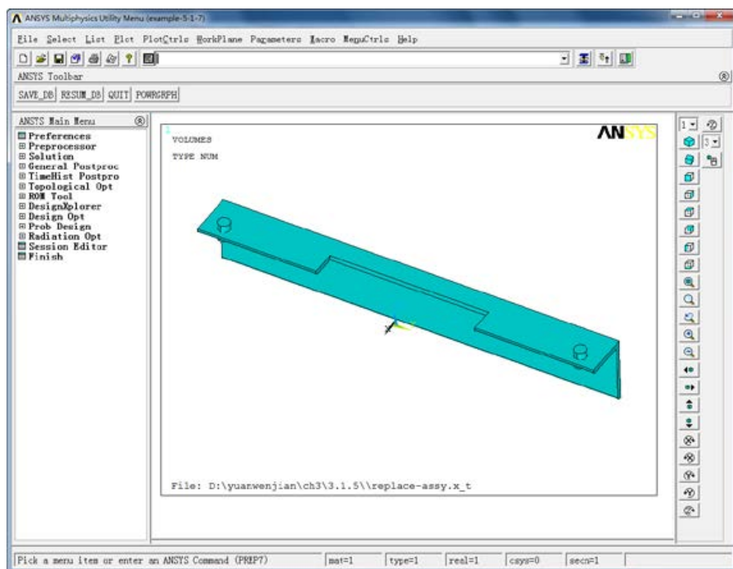


图 3-29 输入 Parasolid 文件后的结果

```
! 改作业名为“replace-assy”
~PARAIN,'replace-assy','x_t',,SOLIDS,0,0
! 输入“replace-assy.x_t”实体参数文件
/NOPR
/GO
/USER,   1
/FACET,NORML
! 打开“Normal Faceting”
/REPLO
SAVE
! 保存数据库
FINISH
```

3.2 实例导航——对输入模型修改

本节的内容是通过实例来介绍对输入的实体进行修改，这一操作是非常重要的。首先按照上节介绍的方法输入 IGES 文件：h_latch.iges。并用“h_latch”作为作业名。

01 偏移工作平面到给定位置。

❶从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > Keypoints +

❷在 ANSYS 输入窗口选择底板的右边的内角点，单击“OK”按钮，如图 3-30 所示。

02 旋转工作平面。

❶从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP by Increments

❷在旋转对话中，在“XY,YZ,ZXAngles”文本框中输入“0,90,0”，单击“OK”按钮，如图 3-31 所示，结果如图 3-32 所示。

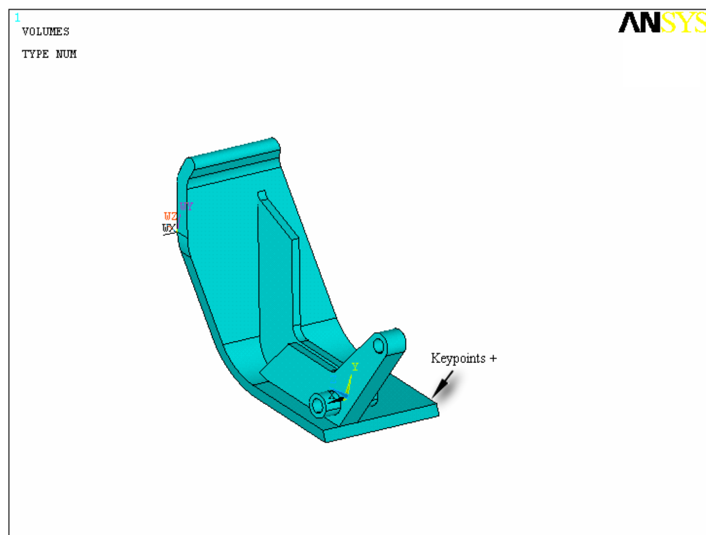


图 3-30 平移工作平面

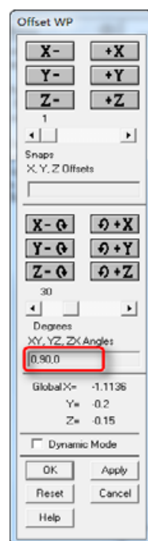


图 3-31 旋转工作平面

03 将激活的坐标系设置为工作平面坐标系。从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane。

04 创建圆柱体。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid Cylinder。

❷在创建圆柱体对话中，文本“WP X”输入“0.55”，“WP Y”输入“0.55”，“Radius”输入“0.15”，“Depth”输入“0.3”，单击“OK”按钮，生成一个圆柱体。输入过程如图 3-33 所示，得到圆柱体，结果如图 3-34 所示。

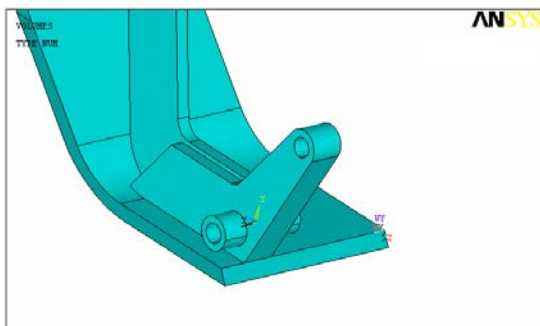


图 3-32 旋转工作平面的结果

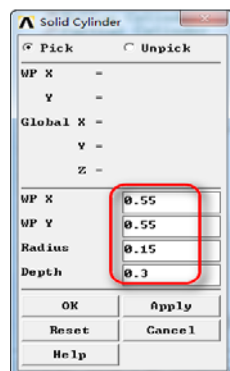


图 3-33 创建圆柱体

05 从总体中“减”去圆柱体形成轴孔。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes。

❷在图形窗口中拾取总体，作为布尔“减”操作的母体，单击“Apply”按钮。

❸拾取刚刚建立的圆柱体作为“减”去的对象，单击“OK”按钮，结果如图 3-35 所示。

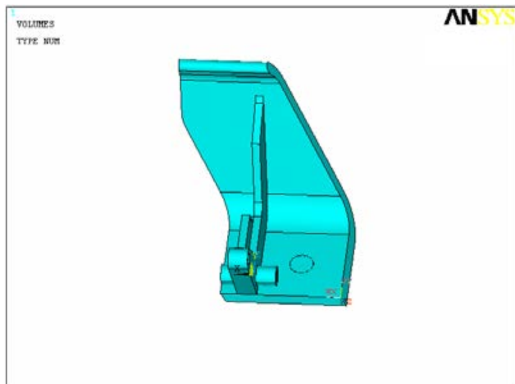


图 3-34 创建圆柱体的结果

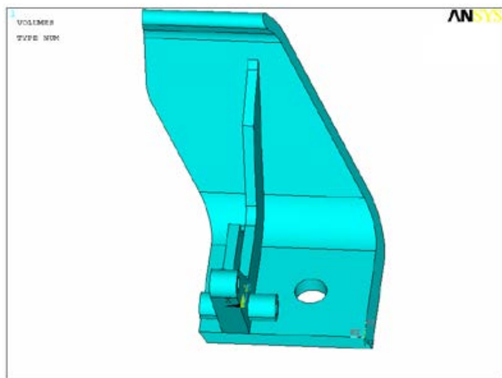


图 3-35 体相减的结果

06 创建倒角面。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Area Fillet。

❷打开图形选择对话框，如图 3-36 所示。

❸在图形窗口中，选取如图 3-37 所示加强肋的两个面，单击“OK”按钮。

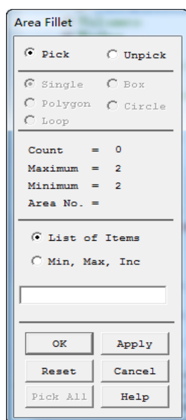


图 3-36 选择创建倒角的面

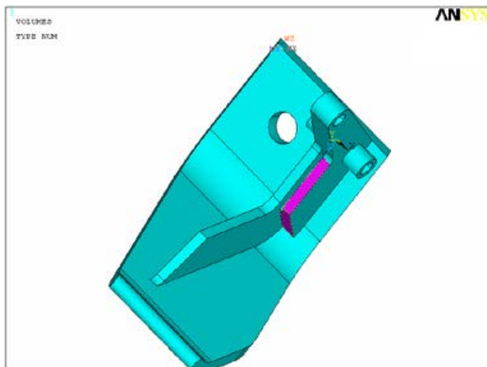


图 3-37 要选择的创建倒角的面

❹在倒角设置对话框中“Fillet radius”文本框输入“0.1”，单击“OK”按钮，如图 3-38 所示。

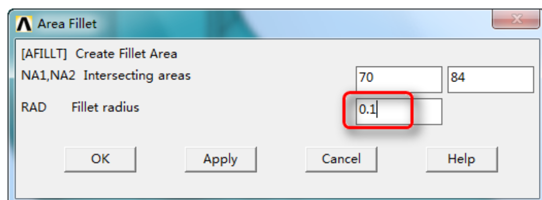


图 3-38 输入倒角半径

修改后的实体如图 3-39 所示。

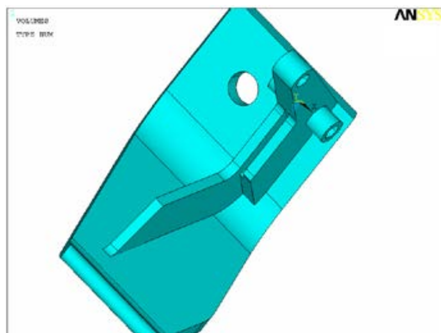


图 3-39 创建的倒角

本例操作的命令流如下：

```
KWPAVE,      247
! 偏移工作平面到 247 点
wprot,0,90,0
! 旋转工作平面
CSYS,4
! 将激活的坐标系设置为工作平面坐标系
FINISH
/PREP7
CYL4,0.55,0.55,0.15, , , ,0.3
! 创建圆柱体
VSBV,       1,       2
! 从总体中“减”去圆柱体形成轴孔
AFILLT,84,70,0.1,
! 创建倒角面
```

3.3 实例导航——自主建模

3.3.1 自顶向下建模实例

自顶向下的建立模型是指按照从体到面、从面到线、从线到点的顺序进行建模，因为线是由点构成，面是由线构成，而体是由面构成，所以称这个顺序为自顶向下建模。在建立模型的过程中，自顶向下并不是绝对的，有时也用到自底向上的方法。现在通过建立一个联轴体来介绍自顶向下建模的方法，联轴体如图 3-40 所示。

建立联轴体具体步骤如下：

首先从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor，进入前处理(/PREP7)。

01 创建圆柱体。

❶进入 ANSYS 工作目录，单击照前面讲过的方法，将“coupling”作为 jobname。

❷从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > modeling > Create > Volumes >

Cylinder > Solid Cylinder。

❸在打开的创建柱体对话框中，“WP X”输入 0，“WP Y”输入 0，“Radius”输入 5，“Depth”输入 10，单击“Apply”按钮。

❹在“WP X”输入“12”，“WP Y”输入“0”，“Radius”输入 3，“Depth”输入 4，单击“OK”按钮生成一个圆柱体。输入过程如图 3-41 所示，得到两个圆柱体，结果如图 3-42 所示。

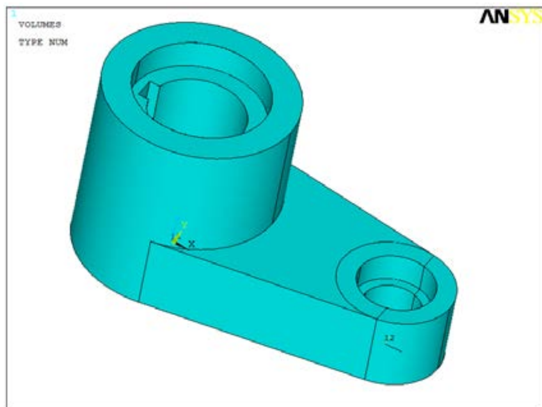


图 3-40 需要创建的联轴体

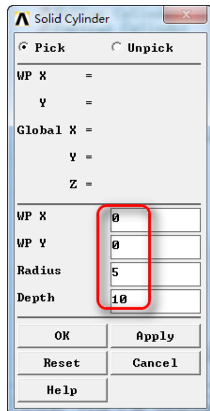


图 3-41 创建圆柱体

❺显示线。从实用菜单中选择 Utility Menu：Plot > Lines，结果如图 3-43 所示。

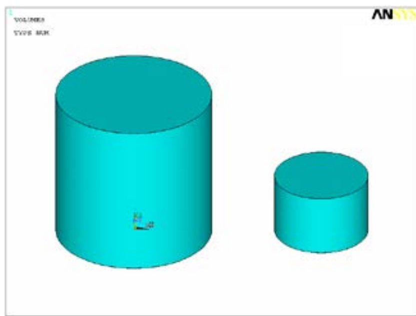


图 3-42 生成的两个圆柱体

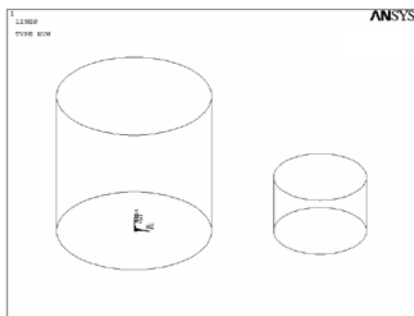


图 3-43 线显示

02 建立两圆柱面相切的 4 个关键点。

❶创建局部坐标系。

①从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At Specified Loc +。

②在打开的创建坐标系对话框中，在“Global Cartesian”文本框中输入“0,0,0”然后单击“OK”按钮，得到“Create Local CS at Specified Location”对话框，如图 3-44 所示。

③在“Ref number of new coord sys”中输入 11，在“Type of coordinate system”中选择“Cylindrical 1”，在“Origin of coord system”文本框中分别输入“0,0,0”，单击“OK”按钮，如图 3-45 所示。

❷建立两圆柱面相切的 4 个关键点。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In

Active CS。

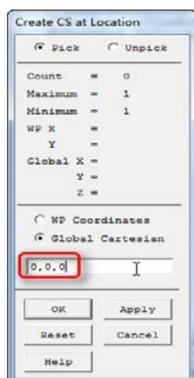


图 3-44 输入坐标系的原点坐标

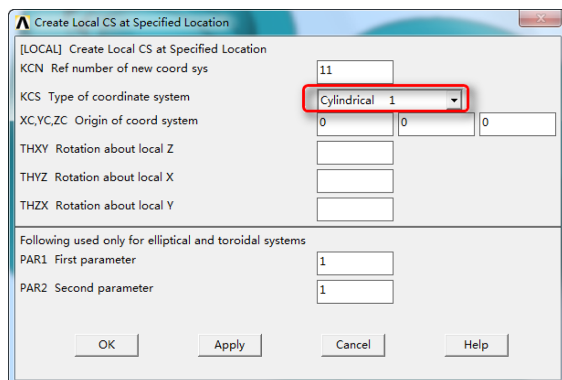


图 3-45 创建局部柱坐标系

②在“Keypoints number”文本框中输入“110”，在“Location in active CS”文本框中分别输入“5,-80.4,0”创建一个关键点，如图 3-46 所示，单击“Apply”按钮，在“Keypoints number”文本框中输入 120，在“Location in active CS”文本框中分别输入“5,80.4,0”，单击“OK”按钮，创建另一个关键点。

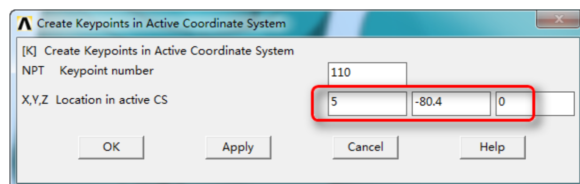


图 3-46 在局部坐标系中创建关键点

❸创建局部坐标系。

①从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At Specified Loc +。

②在“Global Cartesian”文本框中输入“12,0,0”然后单击“OK”按钮，得到“Create Local CS At Specified Location”对话框。

③在“Ref number of new coord sys”中输入 12，在“Type of coordinate system”中选择“Cylindrical 1”，“Origin of coord system”文本框中分别输入“12,0,0”，单击“OK”按钮。

④从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS。

⑤在“Keypoints number”文本框中输入 130，在“Location in active CS”文本框中分别输入“3,-80.4,0”创建一个关键点，单击“Apply”按钮，在“Keypoints number”文本框中输入 140，在“Location in active CS”文本框中分别输入“3,80.4,0”，单击“OK”按钮，创建另一个关键点。

03 生成与圆柱底相交的面。

❶用 4 个相切的点创建 4 条直线。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines >

Strainght lines。

②连接点 110 和点 130，点 120 和点 140，点 110 和点 120，点 130 和点 140，使它们成为 4 条直线，单击“OK”按钮，如图 3-47 所示。

❷创建一个四边形面。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines。

②依次拾取刚刚建立的 4 条直线，单击“OK”按钮，如图 3-48 所示。

生成的四边形面如图 3-49 所示。

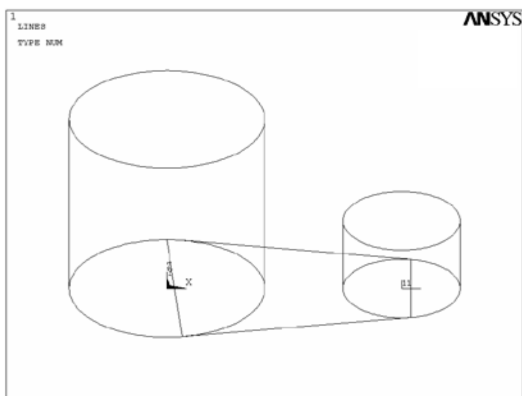


图 3-47 创建 4 条直线

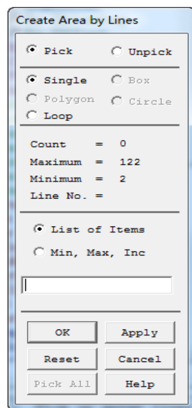


图 3-48 拾取直线创建面

04 沿面的法向拖拉面形成一个四棱柱。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal。

❷在图形窗口中拾取四边形面，单击“OK”按钮，如图 3-50 所示。

❸这时打开创建体对话框，输入 DIST 为-4，厚度的方向是向圆柱所在的方向，单击 “OK”，如图 3-51 所示。

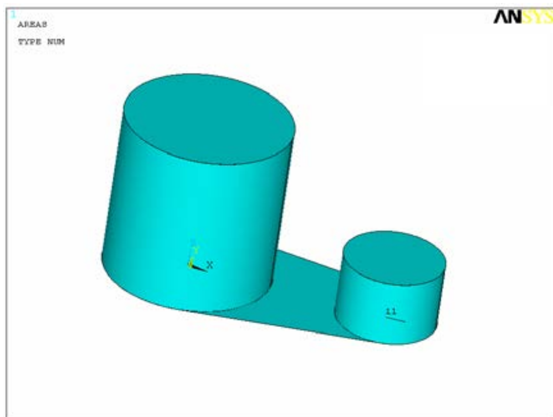


图 3-49 创建四边形面

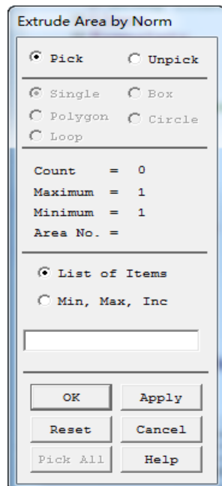


图 3-50 拾取面创建体

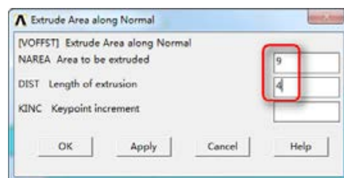


图 3-51 输入体的厚度

生成的四棱柱如图 3-52 所示。

05 形成一个完全的轴孔。

❶将坐标系转到全局直角坐标系下。从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian。

❷偏移工作平面。

①从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations + 。

②在“Global Cartesian”文本框中输入“0,0,8.5”，单击“OK”按钮，如图 3-53 所示。

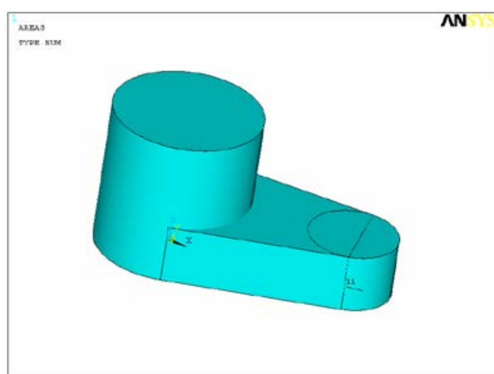


图 3-52 生成的四棱柱

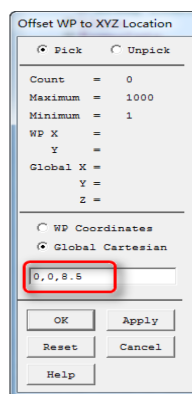


图 3-53 偏移工作平面

❸创建圆柱体。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid Cylinder。

②在创建圆柱体对话框中，WP X 输入 0，WP Y 输入 0，Radius 输入 3.5， Depth 输入 1.5，单击“Apply”按钮。

③WP X 输入 0，WP Y 输入 0，Radius 输入 2.5， Depth 输入-8.5，单击“OK”按钮生成另一个圆柱体。得到两个圆柱体，结果如图 3-54 所示。

❹从联轴体中“减”去圆柱体形成轴孔。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes。

②在图形窗口中拾取联轴体及大圆柱体，作为布尔“减”操作的母体，单击“Apply”按钮。

③在图形窗口中拾取刚刚建立的两个圆柱体作为“减”去的对象，单击“OK”按钮，

所得结果如图 3-55 所示。

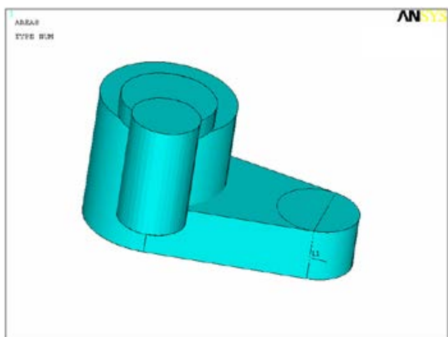


图 3-54 生成两个圆柱体



图 3-55 形成圆轴孔

❺偏移工作平面。

①从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations + 。

②在偏移工作平面对话框中，在“Global Cartesion”文本框中输入“0,0,0”，单击“OK”按钮。

❻生成长方体。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions。

②输入“X1=0,X2=-3,Y1=-0.6,Y2=0.6,Z1=0,Z2=8.5”，如图 3-56 所示。得到的结果如图 3-57 所示

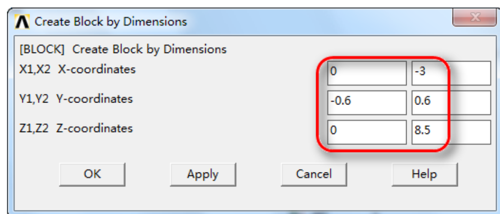


图 3-56 创建长方体

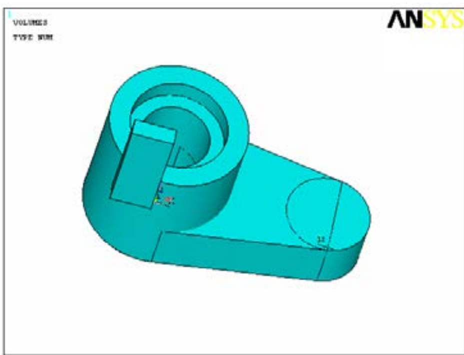


图 3-57 生成长方体

❼从联轴体中再“减”去长方体形成完全的轴孔。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes。

②在图形窗口中拾取联轴体及大圆柱体，作为布尔“减”操作的母体，单击“Apply”按钮。

③在图形窗口中拾取刚刚建立的长方体作为“减”去的对象，单击“OK”按钮，所得结果如图 3-58 所示。

06 形成另一个轴孔。

❶偏移工作平面。

①从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations + 。

②打开工作平面设置对话框，在“Global Cartesian”文本框中输入“12,0,2.5”，单击“OK”按钮。

❷创建圆柱体。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid Cylinder。

②打开创建圆柱体对话框，在 WP X 输入 0，WP Y 输入 0，Radius 输入 2，Depth 输入 1.5，单击“Apply”按钮。

③WP X 输入 0，WP Y 输入 0，Radius 输入 1.5，Depth 输入-2.5，单击“OK”按钮生成另一个圆柱体，得到两个圆柱体。

❸从联轴体中“减”去圆柱体形成轴孔。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes 。

②拾取联轴体，作为布尔“减”操作的母体，单击“Apply”按钮。

③拾取刚建立的两个圆柱体作为“减”去对象，单击“OK”按钮，所得结果如图 3-59 所示。



图 3-58 生成完全的轴孔



图 3-59 形成轴孔

07 连接所有体。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Volumes。

❷在出现的对话框中单击“Pick All”按钮。

❸打开体号显示开关并画体。

①从实用菜单中选择 Utility Menu：PlotCtrls > Numbering。

②设置“Volume numbles”选项为“on”，单击“OK”按钮，所得结果如图 3-60 所示。

08 保存并退出 ANSYS。

❶选取工具条上的 SAVE_DB。

❷选取工具条上的 QUIT。

本例操作的命令流如下：

```
/CLEAR,START
/FILNAME,coupling,0
```

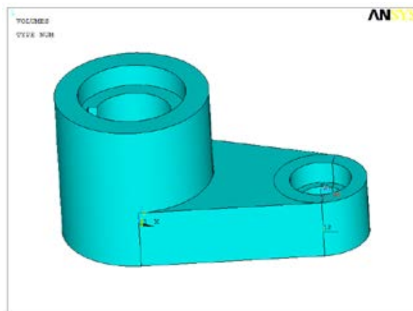


图 3-60 体显示的结果

```
！将“coupling”作为 jobname
/PREP7
CYL4,0,0,5, , , ,10
CYL4,12,0,3, , , ,4
！创建圆柱体
LPLOT
！显示线
LOCAL,11,1,0,0,0, , , ,1,1,
！创建局部坐标系
K,110,5,-80.4,0,
K,120,5,80.4,0,
！建立左圆柱面相切的两个关键点
LOCAL,12,1,12,0,0, , , ,1,1,
！创建局部坐标系
K,130,3,-80.4,0,
K,140,3,80.4,0,
！建立右圆柱面相切的两个关键点
LSTR,       110,      130
LSTR,       120,      140
LSTR,       130,      140
LSTR,       120,      110
！用四个相切的点创建 4 条直线
FLST,2,4,4
FITEM,2,24
FITEM,2,21
FITEM,2,23
FITEM,2,22
AL,P51X
！创建一个四边形面
VOFFST,9,4, ,
！沿面的法向拖拉面形成一个四棱柱,厚度为 4
CSYS,0
！将坐标系转到全局直角坐标系下
```

```
FLST,2,1,8
FITEM,2,0,0,8.5
WPAVE,P51X
!偏移工作平面
CYL4,0,0,3.5, , , ,1.5
CYL4,0,0,2.5, , , ,-8.5
!创建两个圆柱体
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FLST,3,2,6,ORDE,2
FITEM,3,4
FITEM,3,-5
VSBV,P51X,P51X
! 从联轴体中“减”去圆柱体形成轴孔
FLST,2,1,8
FITEM,2,0,0,0
WPAVE,P51X
! 偏移工作平面
BLOCK,0,-3,-0.6,0.6,0,8.5,
! 生成长方体
VSBV,          7,          1
! 从联轴体中再“减”去长方体形成完全的轴孔
FLST,2,1,8
FITEM,2,12,0,2.5
WPAVE,P51X
! 偏移工作平面
CYL4,0,0,2, , , ,1.5
CYL4,0,0,1.5, , , ,-2.5
!创建两个圆柱体
FLST,2,2,6,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,6
FLST,3,2,6,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,4
VSBV,P51X,P51X
! 从联轴体中“减”去圆柱体形成轴孔
FLST,2,3,6,ORDE,3
FITEM,2,3
FITEM,2,5
FITEM,2,7
VADD,P51X
! 连接所有体
```

```
SAVE
FINISH
! 保存并退出 ANSYS
```

3.3.2 自底向上建模实例

自底向上建模与自顶向下建模正好相反，是按照从点到线，从线到面，从面到体的顺序建立模型，因为线是由点构成，面是由线构成，而体是由面构成，所以称这个顺序为自底向上建模。在建立模型的过程中，自底向上并不是绝对的，有时也用到自顶向下的方法。现在通过建立一个平面体来介绍自底向上建模的方法。

01 修改工作目录。进入 ANSYS 工作目录，按照前面讲过的方法，将“spacer”作为 jobname。

02 创建两个圆面。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle > By Dimensions ...

②打开创建圆的对话框，设置 RAD1 = 10，RAD2 = 6，THETA1 = 0，THETA2 = 180，单击“OK”按钮，如图 3-61 所示。

得到如图 3-62 所示的结果。

03 建立另外两个圆面。

❶偏移工作平面到给定位置。

①从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations +。

②打开设置点对话框，在 ANSYS 输入窗口输入 16,0,0，单击“OK”按钮，如图 3-63 所示。

❷将激活的坐标系设置为工作平面坐标系。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Working Plane。

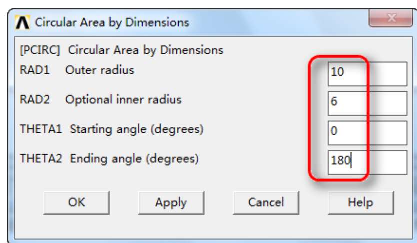


图 3-61 创建圆面

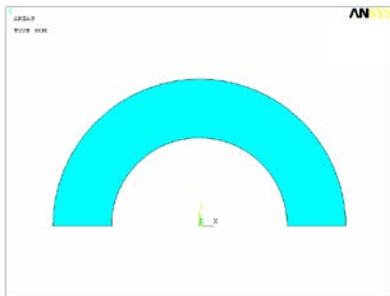


图 3-62 创建圆面的结果

❸创建另两个圆面。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle > By Dimensions ...

②这时会打开创建圆的对话框，设置 RAD1 = 5，RAD2 = 3，THETA1 = 0，THETA2 = 180，然后单击“OK”按钮，如图 3-64 所示。

04 创建两圆面的切线。

❶将激活的坐标系设置为总体柱坐标系。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical

❷定义一个新的关键点

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS …。

②出现定义点的对话框，设置点号为 110，X=10, Y=73, 单击“OK”按钮，如图 3-65 所示。

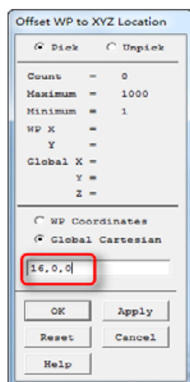


图 3-63 偏移工作平面

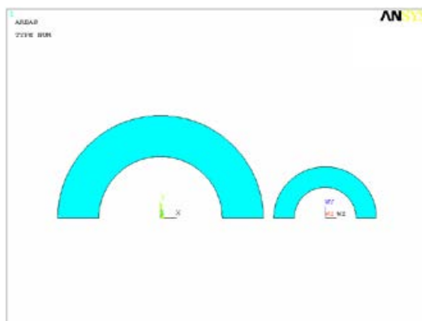


图 3-64 创建另两个圆面

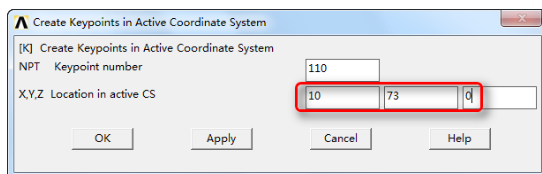


图 3-65 创建关键点

❸创建局部坐标系。

①从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > At Specified Loc +。

②打开坐标系设置对话框，在 Global Cartesian 文本框中输入 16,0,0，然后单击“OK”按钮，得到 Create Local CS At Specified Location 对话框。

③在 Ref number of new coord sys 中输入 11，在 Type of coordinate system 中选择 Cylindrical 1，在 Origin of coord system 文本框中分别输入 16,0,0，单击“OK”按钮，如图 3-66 所示。

❹定义另一个新的关键点。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS …。

②打开定义点的对话框，设置点号为 120，X=5, Y=73，单击“OK”按钮。

❺将激活的坐标系设置为总体笛卡尔坐标系。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > ChangeActive CS to > Global Cartesian。

❻在刚刚建立的关键点（110 和 120）之间创建直线。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Lines >

Lines > Straight Line。

②在选择窗口中输入如图 3-67 所示的两个关键点的点号，然后单击“OK”按钮。

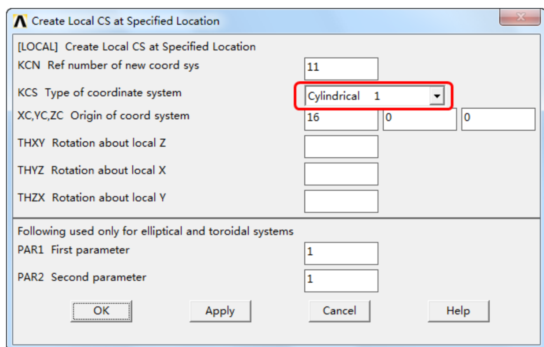


图 3-66 创建局部坐标系

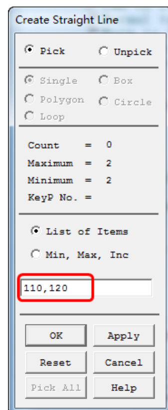


图 3-67 创建线

❼显示线。从应用菜单中选择 Utility Menu： Plot > Lines。

所得结果如图 3-68 所示。

05 创建两圆柱面之间的连接面。

❶将激活的坐标系设置为总体柱坐标系。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical 。

❷创建直线。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord。

②拾取如图 3-68 中的大圆小段圆弧上的两个关键点，然后单击“OK”按钮，如图 3-69 所示。

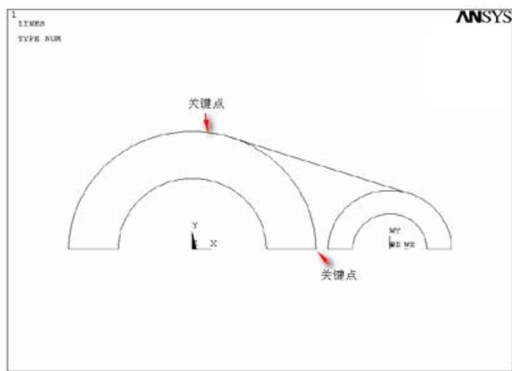


图 3-68 创建切线的结果

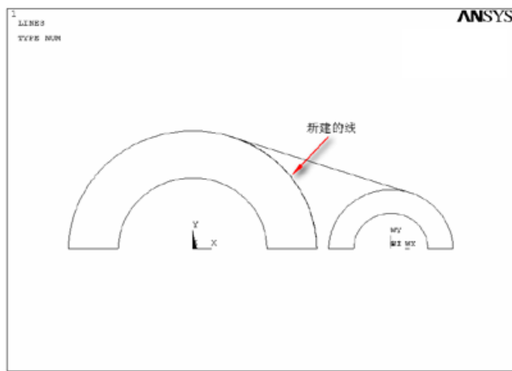


图 3-69 创建线

❸将激活的坐标系设置为局部柱面坐标系。

①从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Specified Coord Sys。

②在 Coordinate system number 文本框中输入坐标系编号 11，单击“OK”按钮，如图 3-70 所示。

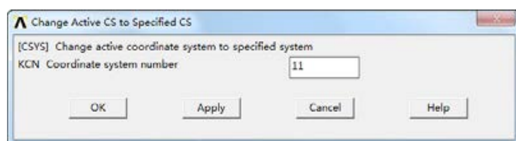


图 3-70 激活局部坐标系

❹在局部柱面坐标系中创建圆弧线。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord。

②拾取如图 3-71 所示的关键点 6 和 120，点 1 和 6，，然后单击“OK”按钮，结果如图 3-72 所示。

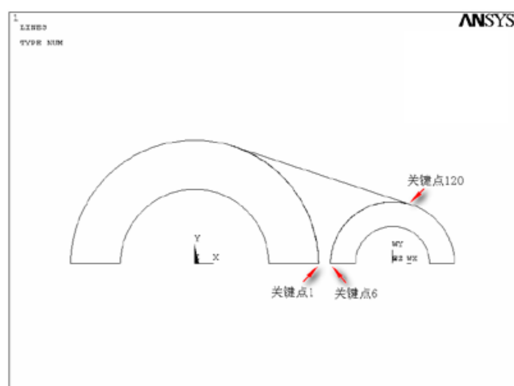


图 3-71 创建线

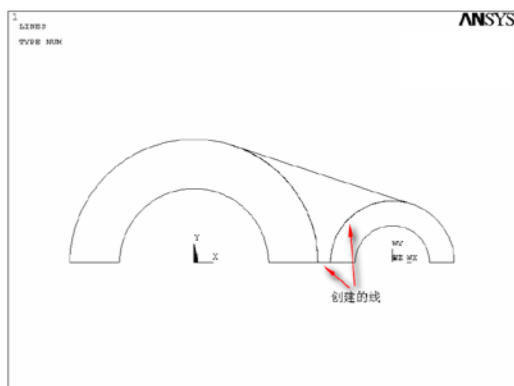


图 3-72 创建线的结果

❺将激活的坐标系设置为总体笛卡尔坐标系。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Global Cartesian。

❻由前面定义的线创建一个新的面。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines。

②拾取刚刚建立的 4 条线，如图 3-73 所示，然后单击“OK”按钮。

❼打开面的编号并画面。

①从应用菜单中选择 Utility Menu：PlotCtrls > Numbering。

②打开点、线、面的编号，单击“OK”按钮，如图 3-74 所示。

❽从应用菜单中选择 Utility Menu：Plot > Areas。

06 把所有面加起来形成一个面。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas。

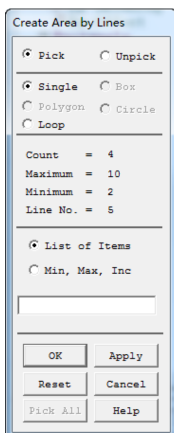
❷在打开的对话框中选择 Pick All 将面进行相加。所得结果如图 3-75 所示。

07 形成一个矩形孔。

❶创建一个矩形面。

①从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > Global Origin。

②从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions ...。



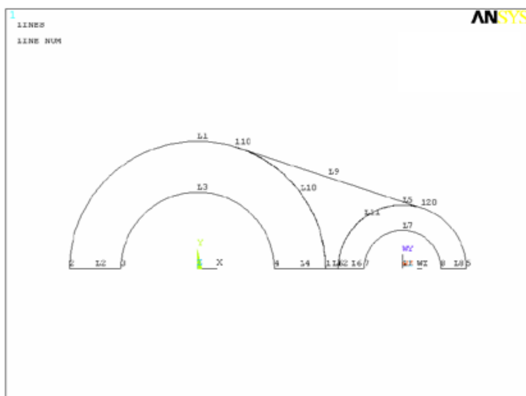


图 3-73 将面进行相加　　　　图 3-74 创建面

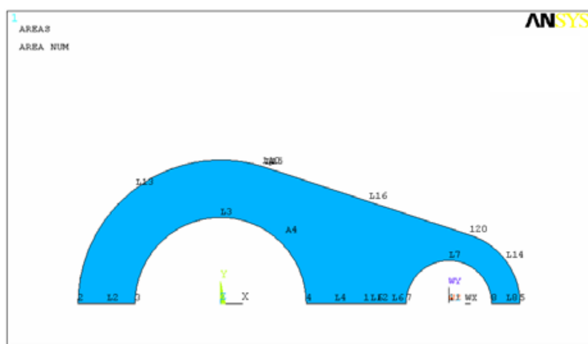


图 3-75 将面相加的结果

③在出现的定义矩形面对话框中，设置 X1 = -2，X2 = 2，Y1 = 0，Y2 = 8，单击“OK”按钮，如图 3-76 所示。

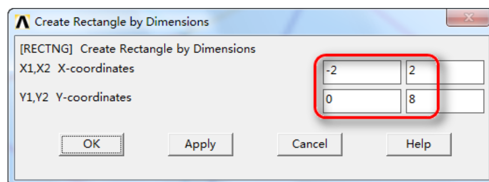


图 3-76 创建矩形面

得到结果如图 3-77 所示。

❷从总体面中“减”去矩形面形成孔。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Areas。

②在图形窗口中选择总体面，作为布尔“减”操作的母体，单击“Apply”按钮。

③拾取刚刚建立的矩形面作为“减”去的对象，单击“OK”按钮，所得结果如图3-78 所示。

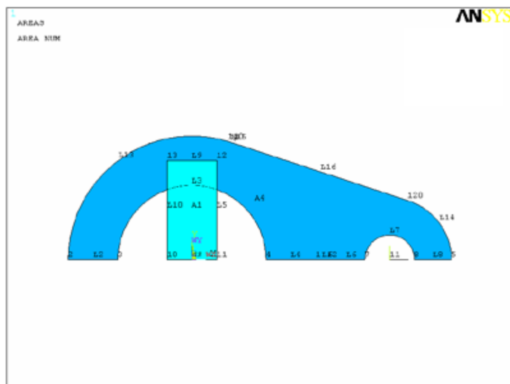


图 3-77 创建矩形面的结果

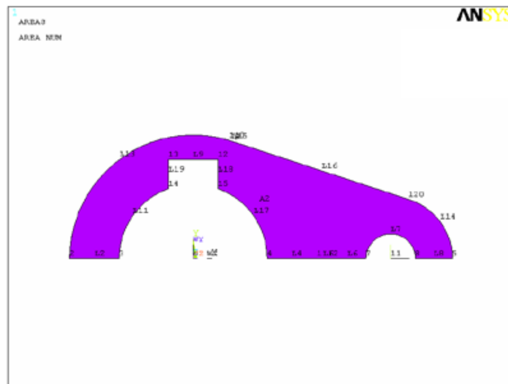


图 3-78 减去孔的结果

08 将面进行映射得到完全的面。

❶旋转工作平面。

①从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP by Increments。

②在 XY,YZ,ZXAngles 文本框中输入 0,0,90，单击“OK”按钮，如图 3-79 所示。

❷用工作平面切分面。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by WrkPlane。

②在选择对话框中，选择 Pick All，如图 3-80 所示，所得结果如图 3-81 所示。

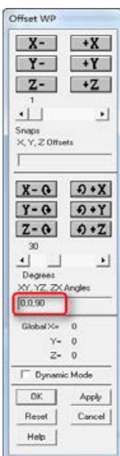


图 3-79 旋转工作平面

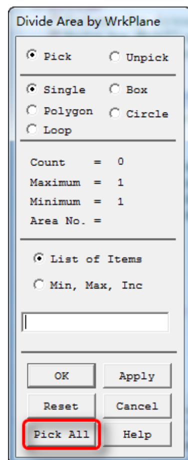


图 3-80 用工作平面切分面

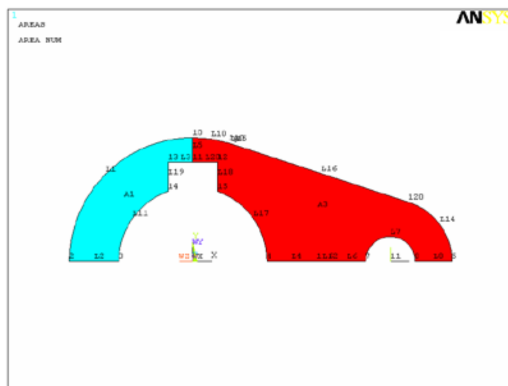


图 3-81 切分面的结果

❸删除右边的面。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below。

②选择左边的面，单击“OK”按钮，如图 3-82 所示。

❹将面沿 Y－Z 面进行映射(在 X 方向)。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas 。

②选择 Pick All，选择 Y-Z 面，单击“OK”按钮，如图 3-83 所示。

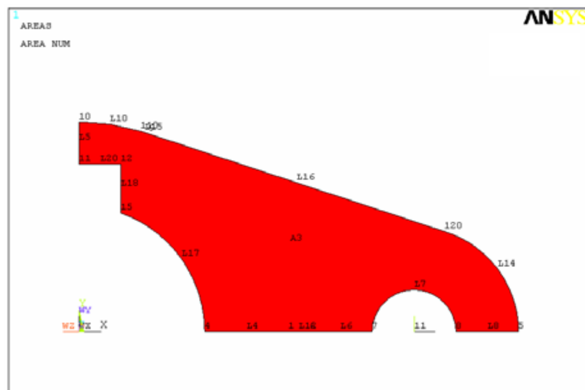


图 3-82 删除右边的面

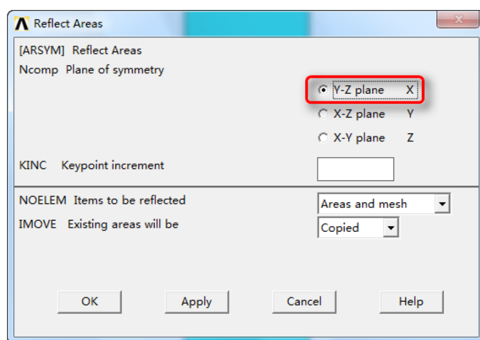


图 3-83 将面沿 Y－Z 面进行映射

所得结果如图 3-84 所示。

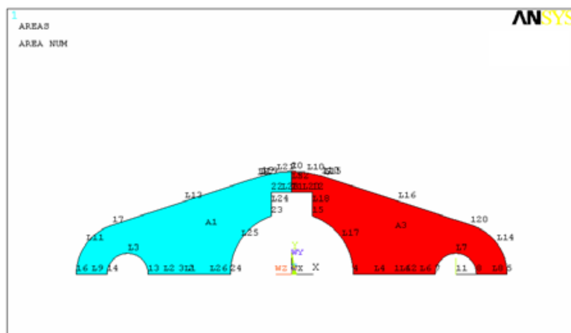


图 3-84 将面沿 Y－Z 面进行映射的结果

❺将面沿 X－Z 面进行映射（在 Y 方向）。

①从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas。

②选择 Pick All，选择 X-Z 面，单击“OK”按钮，如图 3-85 所示。

所得结果如图 3-86 所示。

09 存储数据库并离开 ANSYS。

❶在工具条上拾取“SAVE_DB”。

❷选取工具条上的 QUIT。

本例操作的命令流如下：

```
/PREP7
```

```
PCIRC,10,6,0,180,
！创建两个圆面
```

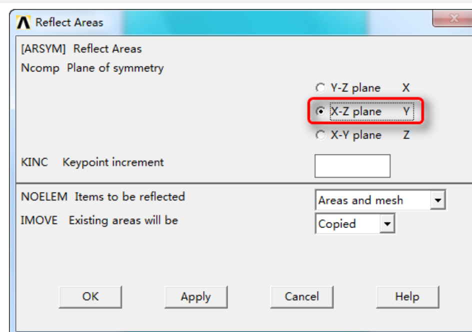


图 3-85 将面沿 X－Z 面进行映射图

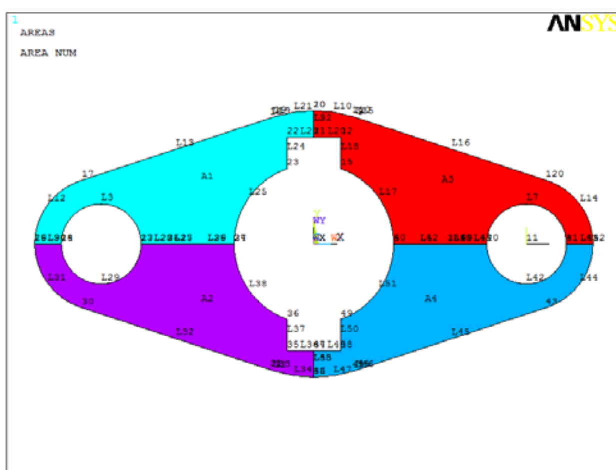


图 3-86 将面沿 X－Z 面进行映射的结果

```
FLST,2,1,8
FITEM,2,16,0,0
！偏移工作平面到给定位置
WPAVE,P51X
CSYS,4
！将激活的坐标系设置为工作平面坐标系
PCIRC,5,3,0,180,
！创建另两个圆面
CSYS,1
！将激活的坐标系设置为总体柱坐标系
K,110,10,73,,
！定义一个新的关键点
LOCAL,11,1,16,0,0, , , ,1,1,
！创建局部坐标系
K,120,5,73,,
！定义另一个新的关键点
```

```
CSYS,0
! 将激活的坐标系设置为总体笛卡尔坐标系
LSTR,     110,     120
! 在刚刚建立的关键点（110 和 120）之间创建直线
LPLOT
! 显示线
CSYS,1
! 将激活的坐标系设置为总体柱坐标系
L,     110,      1
! 创建直线
CSYS,11,
! 将激活的坐标系设置为局部柱面坐标系
L,       1,      6
L,       6,    120
! 在局部柱面坐标系中创建圆弧线
CSYS,0
! 将激活的坐标系设置为总体笛卡尔坐标系
FLST,2,4,4
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,9
AL,P51X
! 由前面定义的线创建一个新的面
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,0
!*
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!*
APLOT
! 打开面的编号并画面
FLST,2,3,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-3
AADD,P51X
! 把所有面加起来形成一个面
CSYS,0
```

```
WPAVE,0,0,0
CSYS,0
RECTNG,-2,2,0,8,
! 创建一个矩形面
ASBA,       4,       1
! 从总体面中“减”去矩形面形成孔
wprot,0,0,90
! 旋转工作平面
ASBW,       2
! 用工作平面切分面
ADELE,       1, , ,1
! 删除右边的面
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,3
ARSYM,X,P51X, , , ,0,0
! 将面沿 Y－Z 面进行映射(在 X 方向)
FLST,3,2,5,ORDE,2
FITEM,3,1
FITEM,3,3
ARSYM,Y,P51X, , , ,0,0
! 将面沿 X－Z 面进行映射 (在 Y 方向)
/REPLOT,RESIZE
SAVE
FINISH
! 存储数据库并离开 ANSYS
```

第 4 章

网格划分

网格划分是进行有限元分析的基础，它要求考虑的问题较多，需要的工作量较大，所划分的网格形式对计算精度和计算规模将产生直接影响，因此需要学习正确合理的网格划分方法。

学习要点

- 分配单元属性
- 网格划分的控制
- 有限元网格模型生成
- 编号控制

4.1 有限元网格概论

生成节点和单元的网格划分过程包括 3 个步骤：

（1）定义单元属性。

（2）定义网格生成控制（非必须，因为默认的网格生成控制对多数模型生成都是合适的。如果没有指定网格生成控制，程序会用 DSIZE 命令使用默认设置生成网格。当然，也可以手动控制生成质量更好的自由网格），ANSYS 程序提供了大量的网格生成控制，可按需要选择。

（3）生成网格。在对模型进行网格划分之前，甚至在建立模型之前，要明确是采用自由网格还是采用映射网格来分析。自由网格对单元形状无限制，并且没有特定的准则。而映射网格则对包含的单元形状有限制，而且必须满足特定的规则。映射面网格只包含四边形或三角形单元，映射体网格只包含六面体单元。另外，映射网格具有规则的排列形状，如果想要这种网格类型，所生成的几何模型必须具有一系列相当规则的体或面。自由网格和映射网格示意图如图 4-1 所示。

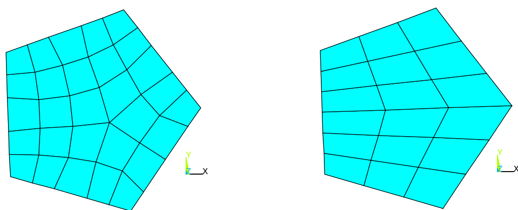


图 4-1　自由网格和映射网格示意图

可用“MSHESKEY”命令或相应的 GUI 路径选择自由网格或映射网格。注意，所用网格控制将随自由网格或映射网格划分而不同。

4.2 设定单元属性

在生成节点和单元网格之前，必须定义合适的单元属性，包括如下几项：

（1）单元类型（例如 BEAM3，SHELL61 等）。

（2）实常数（例如厚度和横截面积）。

（3）材料性质（例如弹性模量、热传导系数等）。

（4）单元坐标系。

（5）截面号（只对 BEAM44，BEAM188，BEAM189 单元有效）。

4.2.1 生成单元属性表

为了定义单元属性，首先必须建立一些单元属性表。典型的包括单元类型（命令 ET 或者 GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete）、实常数（命

令 R 或者 GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Real Constants、材料性质（命令 MP 和 TB 或者 GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Material Props > material option）。

利用 LOCAL、CLOCAL 等命令可以组集坐标系表（GUI 路径：Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS > option）。这个表用来给单元分配单元坐标系。

并非所有的单元类型都可用这种方式来分配单元坐标系。

对于用 BEAM44、BEAM188、BEAM189 单元划分的梁网格，可利用命令“SECTYPE”和“SECDATA”（GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Sections）创建截面号表格。

方向关键点是线的属性而不是单元的属性，不能创建方向关键点表格。

可以用命令“ETLIST”来显示单元类型，命令“RLIST”来显示实常数，“MPLIST”来显示材料属性，上述操作对应的 GUI 路径是：Utility Menu > List > Properties > property type。另外，还可以用命令“CSLIST”（GUI 路径：Utility Menu > List > Other > Local Coord Sys）来显示坐标系，命令“SLIST”（GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Sections > List Sections）来显示截面号。

4.2.2 在划分网格之前分配单元属性

一旦建立的单元属性表，通过指向表中合适的条目即可对模型的不同部分分配单元属性。指针就是参考号码集，包括材料号（MAT），实常数号（TEAL），单元类型号（TYPE），坐标系号（ESYS），以及使用“BEAM188”和“BEAM189”单元时的截面号（SECNUM）。可以直接给所选的实体模型图元分配单元属性，或者定义默认的属性在生成单元的网格划分中使用。

如前面所提到的，在给梁划分网格时给线分配的方向关键点是线的属性而不是单元属性，所以必须是直接分配给所选线，而不能定义默认的方向关键点以备后面划分网格时直接使用。

1．直接给实体模型图元分配单元属性

给实体模型分配单元属性时，允许对模型的每个区域预置单元属性，从而避免在网格划分过程中重置单元属性。清除实体模型的节点和单元不会删除直接分配给图元的属性。

利用下列命令和相应的 GUI 路径可直接给实体模型分配单元属性：

给关键点分配属性：

命令：KATT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Keypoints。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked KPs。

给线分配属性：

命令：LATT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines。

给面分配属性：

命令：AATT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Areas。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas。

给体分配属性：

命令：VATT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Volumes。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Volumes。

2．分配默认属性

可以通过指向属性表的不同条目来分配默认的属性，在开始划分网格时，ANSYS 程序会自动将默认属性分配给模型。直接分配给模型的单元属性将取代上述默认属性，而且，当清除实体模型图元的节点和单元时，其默认的单元属性也将被删除。

可利用如下方式分配默认的单元属性：

命令：TYPE, REAL, MAT, ESYS, SECNUM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes。

3．自动选择维数正确的单元类型

有些情况下，ANSYS 程序能对网格划分或拖拉操作选择正确的单元类型，当选择明显正确时，不必人为地转换单元类型。

特殊地，当未将单元属性（xATT）直接分配给实体模型时，或者默认的单元属性（TYPE）对于要执行的操作维数不对时，而且已定义的单元属性表中只有一个维数正确的单元，ANSYS 程序会自动的利用该种单元类型执行这个操作。

受此影响的网格划分和拖拉操作命令有：KMESH、LMESH、AMESH、VMESH、FVMESH、VOFFST、VEXT、VDRAG、VROTAT、VSWEEP。

4．在节点处定义不同的厚度

可以利用下列方式对壳单元在节点处定义不同的厚度：

命令：RTHICK。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Thickness Func。

壳单元可以模拟复杂的厚度分布，以“SHELL63”为例，允许给每个单元的 4 个角点指定不同的厚度，单元内部的厚度假定是在 4 个角点厚度之间光滑变化。给一群单元指定复杂的厚度变化是有一定难度的，特别是每一个单元都需要单独指定其角点厚度的时候，在这种情况下，利用命令“RTHICH”能大大简化模型定义。

下面用一个实例来详细说明该过程，该实例的模型为 10×10 的矩形板，用 0.5×0.5 的方形“SHELL63”单元划分网格。先在 ANSYS 程序里输入如下命令流：

```
/TITLE, RTHICK Example
/PREP7
ET,1,63
```

```
RECT,,10,,10
ESHAPE,2
ESIZE,,20
AMESH,1
EPLO
```

得到初始的网格图如图 4-2 所示。

假定板厚按下述公式变化：$h= 0.5 + 0.2x + 0.02y^2$，为了模拟该厚度变化，创建一组参数给节点设定相应的厚度值。换句话说，数组里面的第N个数对应于第N个节点的厚度，命令流如下：

```
MXNODE = NDINQR(0,14)
*DIM,THICK,,MXNODE
*DO,NODE,1,MXNODE
    *IF,NSEL(NODE),EQ,1,THEN
        THICK(node) = 0.5 + 0.2*NX(NODE) + 0.02*NY(NODE)**2
    *ENDIF
*ENDDO
NODE = $MXNODE
```

利用“RTHICK”函数将这组表示厚度的参数分配到单元上，结果如图 4-3 所示。

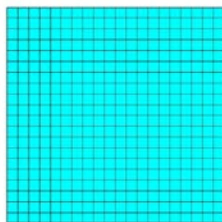


图 4-2 初始的网格图

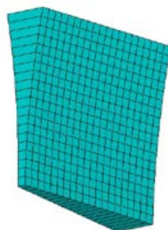


图 4-3 不同厚度的壳单元

```
RTHICK,THICK(1),1,2,3,4
/ESHAPE,1.0    $ /USER,1    $ /DIST,1,7
/VIEW,1,-0.75,-0.28,0.6    $ /ANG,1,-1
/FOC,1,5.3,5.3,0.27    $ EPLO
```

4.3 网格划分的控制

网格划分控制能建立用在实体模型划分网格的因素，例如单元形状、中间节点位置、单元大小等。此步骤使整个分析中最重要的步骤之一，因为此阶段得到的有限元网格将对分析的准确性和经济性起决定作用。

4.3.1 ANSYS网格划分工具（MeshTool）

ANSYS 网格划分工具（GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool）提供了最常用的网格划分控制和最常用的网格划分操作的便捷途径。其功能主要包括：

（1）控制“SmartSizing”水平。
（2）设置单元尺寸控制。
（3）指定单元形状。
（4）指定网格划分类型（自由或映射）。
（5）对实体模型图元划分网格。
（6）清楚网格。
（7）细化网格。

4.3.2 单元形状

ANSYS 程序允许在同一个划分区域出现多种单元形状，例如同一区域的面单元可以是四边形也可以是三角形，但建议尽量不要在同一个模型中混用六面体和四面体单元。

下面简单介绍一下单元形状的退化，如图 4-4 所示。在划分网格时，应该尽量避免使用退化单元。

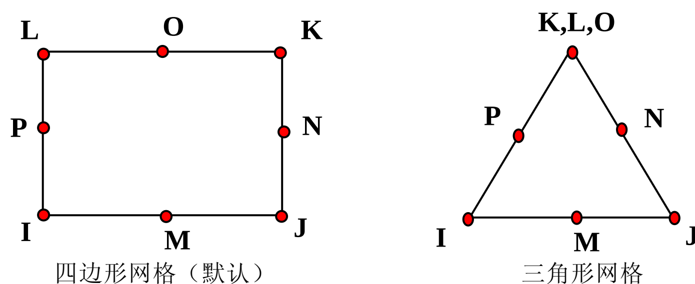


图 4-4 四边形单元形状的退化

用下列方法指定单元形状：

命令：MSHAPE,KEY,Dimension。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided。

如果正在使用 MSHAPE 命令，维数（2D 或 3D）的值表明待划分的网格模型的维数，KEY 值（0 或 1）表示划分网格的形状：

KEY=0，如果 Dimension=2D，ANSYS 将用四边形单元划分网格，如果 Dimension=3D，ANSYS 将用六面体单元划分网格。

KEY=1，如果 Dimension=2D，ANSYS 将用三角形单元划分网格，如果 Dimension=3D，ANSYS 将用四面体单元划分网格。

有些情况下，MSHAPE 命令及合适的网格划分命令（AMESH、YMESH 或相应的 GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > meshing option）就是对模型划分网格的全部所需。每个单元的大小由指定的默认单元大小（AMRTSIZE 或 DSIZE）确定。例如图 4-5 左边的模型用“VMESH”命令生成右边的网格。

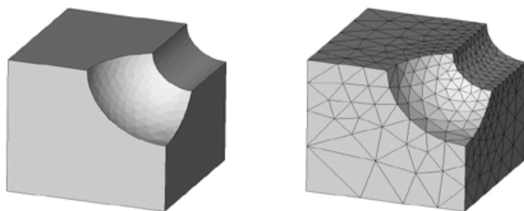


图 4-5 默认单元尺寸

4.3.3 选择自由或映射网格划分

除了指定单元形状之外，还需指定对模型进行网格划分的类型（自由划分或映射划分），方法如下：

命令：MSHKEY。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

单元形状（MSHAPE）和网格划分类型（MSHEKEY）的设置共同影响网格的生成，表 4-1 列出了 ANSYS 程序支持的单元形状和网格划分类型。

表 4-1 ANSYS 程序支持的单元形状和网格划分类型

单元形状	自由划分	映射划分	既可以映射划分又可以自由划分
四边形	Yes	Yes	Yes
三角形	Yes	Yes	Yes
六面体	No	Yes	No
四面体	Yes	No	No

4.3.4 控制单元边中节点的位置

当使用二次单元划分网格时，可以控制中间节点的位置，有两种选择：

（1）边界区域单元在中间节点沿着边界线或者面的弯曲方向，这是默认设置。

（2）设置所有单元的中间节点且单元边是直的，此选项允许沿曲线进行粗糙的网格划分，但是模型的弯曲并不与之相配。

可用如下方法控制中间节点的位置：

命令：MSHMID。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

4.3.5 划分自由网格时的单元尺寸控制（SmartSizing）

默认的，“DESIZE”命令方法控制单元大小在自由网格划分中的使用，但一般推荐

使用“SmartSizing”，为打开“SmartSizing”，只要在“SMRTSIZE”命令中指定单元大小即可。

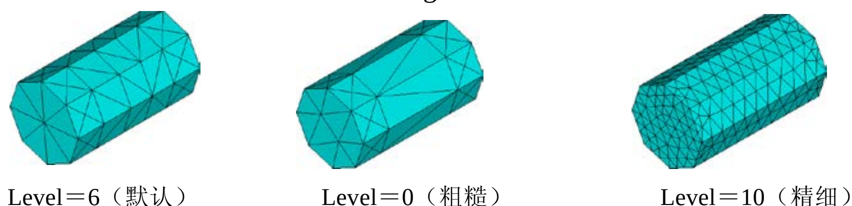
ANSYS 里面有两种“SmartSizing”控制：

（1）基本的控制。利用基本的控制，可以简单的指定网格划分的粗细程度，从 1（细网格）到 10（粗网格），程序会自动的设置一系列独立的控制值用来生成想要的大小，方法如下：

命令：SMRTSIZE,SIZLVL。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool。

图 4-6 表示利用几个不同的“SmartSizing”设置生成的网格。



Level＝6（默认）　　Level＝0（粗糙）　　Level＝10（精细）

图 4-6 对同一模型该面 SmartSizing 的划分结果

（2）高级的控制。ANSYS 还允许使用高级方法专门设置人工控制网格质量，方法如下：

命令：SMRTSIZE and ESIZE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > SmartSize > Adv Opts。

4.3.6 映射网格划分中单元的默认尺寸

DESIZE 命令（GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Other）常用来控制映射网格划分的单元尺寸，同时也用在自由网格划分的默认设置，但是，对于自由网格划分，建议使用“SmartSizing”（SMRTSIZE）。

对于较大的模型，通过“DESIZE”命令查看默认的网格尺寸是明智的，可通过显示线的分割来观察将要划分的网格情况。预查看网格划分的步骤如下：

（1）建立实体模型。

（2）选择单元类型。

（3）选择容许的单元形状（MSHAPE）。

（4）选择网格划分类型（自由或映射）（MSHKEY）。

（5）键入“LESIZE，ALL”（通过 DESIZE 规定调整线的分割数）。

（6）显示线（LPLOT）。

下面用个实例来说明：

如果觉得网格太粗糙，可用通过改变单元尺寸或者线上的单元份数来加密网格，方法如下：

选择 GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize >

Layers > Picked Lines

弹出“Elements Sizes on Picked Lines”拾取菜单，用鼠标单击拾取屏幕上的相应线段，如图 4-7 所示。单击“OK”按钮，弹出“Elements Sizes on Picked Lines”对话框，如图 4-8 所示，在“SIZE Element edge length”后面输入具体数值（它表示单元的尺寸），或者是在“NDIV No of element divisions”后面输入正整数（它表示所选择的线段上的单元份数），单击“OK”按钮。然后重新划分网格，如图 4-9 所示。

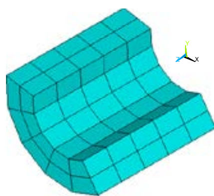


图 4-7 粗糙的网格

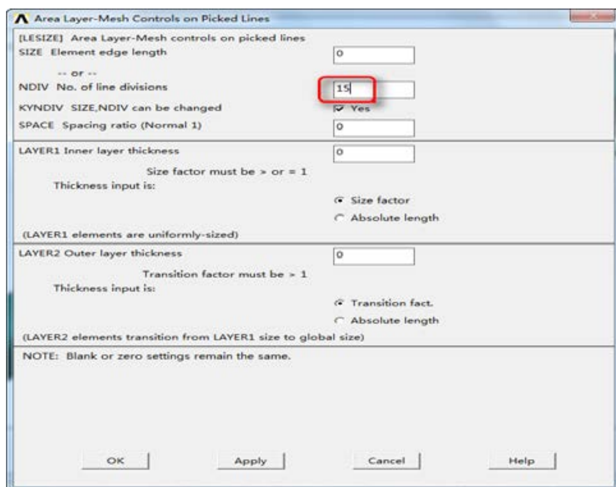


图 4-8 “Elements Sizes on Picked Lines”对话框

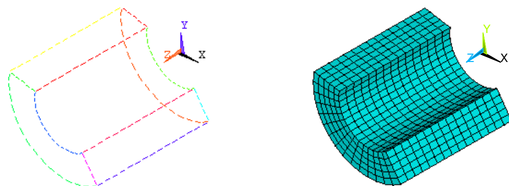


图 4-9 预览改进的网格

4.3.7 局部网格划分控制

在许多情况下，对结构的物理性质来说用默认单元尺寸生成的网格不合适，例如有应力集中或奇异的模型。在这个情况下，需要将网格局部细化，详细说明如下：

（1）通过表面的边界所用的单元尺寸控制总体的单元尺寸，或者控制每条线划分的单元数：

命令：ESIZE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size。

（2）控制关键点附近的单元尺寸：

命令：KESIZE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Keypoints >

All KPs。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Keypoints > Picked KPs。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Keypoints > Clr Size。

（3）控制给定线上的单元数：

命令：LESIZE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > All Lines。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Clr Size。

上述所有定义尺寸的方法都可以一起使用，但遵循一定的优先级别，具体说明如下：

用“DESIZE”定义单元尺寸时，对任何给定线，沿线定义的单元尺寸优先级如下：

用“LESIZE”指定的为最高级，“KESIZE”次之，“ESIZE”再次之，“DESIZE”最低级。

用“SMRTSIZE”定义单元尺寸时，优先级如下：“LESIZE”为最高级，“KESIZE”次之，“SMRTSIZE”为最低级。

4.3.8 内部网格划分控制

前面关于网格尺寸的讨论集中在实体模型边界的外部单元尺寸的定义（LESIZE、ESIZE 等），然而，也可以在面的内部（即：非边界处）没有可以引导网格划分的尺寸线处控制网格划分，方法如下：

命令：MOPT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Area Cntrls。

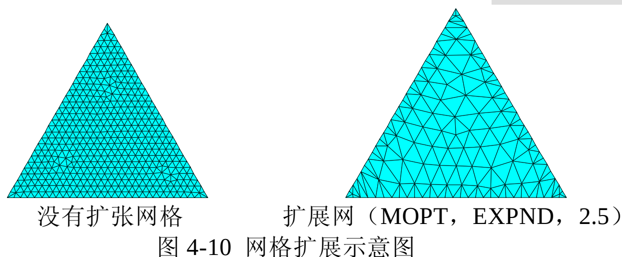
1. 控制网格的扩展

“MOPT”命令中的“Lab=EXPND”选项可以用来引导在一个面的边界处将网格划分较细，而内部则较粗，如图 4-10 所示。

图 4-10 中，左边网格是由 ESIZE 命令（GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size）对面进行设定生成的，右边网格是利用“MOPT”命令的扩展功能（Lab=EXPND）生成的，其区别显而易见。

2. 控制网格过渡

图 4-10 中的网格还可以进一步改善，“MOPT”命令中的“Lab=TRANS”项可以用来控制网格从细到粗的过渡，如图 4-11 所示。



没有扩张网格　　扩展网（MOPT，EXPND，2.5）

图 4-10 网格扩展示意图

图 4-11 控制了网格过渡（MOPT，EXPND，1.5）

3. 控制 ANSYS 的网格划分器

可用 MOPT 命令控制表面网格划分器（三角形和四边形）和四面体网格划分器，使 ANSYS 执行网格划分操作（AMESH、VMESH）。

命令：MOPT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

弹出“Mesher Options”对话框如图 4-12 所示，该对话框中，“AMESH”后面的下拉列表对应三角形表面网格划分，包括 Program choose（默认）、main、Alternate 和 Alternate24 个选项；QMESH 对应四边形表面网格划分，包括 Program choose（默认）、main 和 Alternate 3 项，其中 main 又称为 Q-Morph（quad-morphing）网格划分器，它多数情况下能得到高质量的单元，如图 4-13 所示，另外，Q-Morph 网格划分器要求面的边界线的分割总数是偶数，否则将产生三角形单元；VMESH 对应四面体网格划分，包括 Program choose（默认）、Alternate 和 main 3 项。

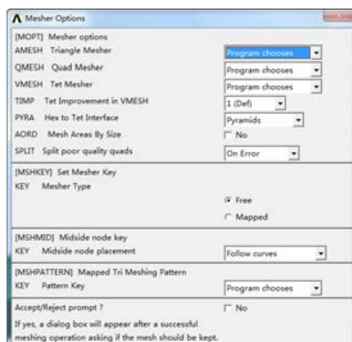
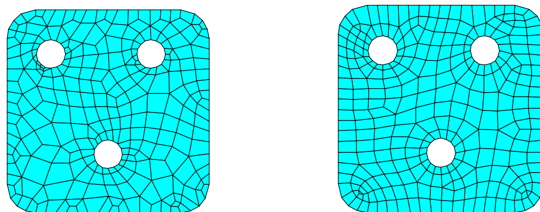


图 4-12 “Mesher Options”对话框



“Alternate”网格划分器　　”Q-Morph”网格划分器

图 4-13 网格划分器

4. 控制四面体单元的改进

ANSYS 程序允许对四面体单元作进一步改进，方法如下：

命令：MOPT,TIMP,Value。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

弹出“Mesher Options”对话框如图 4-12 所示，该对话框中，“TIMP”后面的下拉列表表示四面体单元改进的程度，从 1 到 6，1 表示提供最小的改进，5 表示对线性四面体单元提供最大的改进，6 表示对二次四面体单元提供最大的改进。

4.3.9 生成过渡棱锥单元

ANSYS 程序在下列情况下会生成过渡的棱锥单元：

（1）准备对体用四面体单元划分网格，待划分的体直接与已用六面体单元划分网格的体相连。

（2）准备用四面体单元划分网格，而目标体上至少有一个面已经用四边形网格划分。

图 4-14 所示为一个过渡网格的实例。

当对体用四面体单元进行网格划分时，为生成过渡棱锥单元，应事先满足的条件为：

（1）设定单元属性时，需确定给体分配的单元类型可以退化为棱锥形状，这种单元包括 SOLID62, VISCO89, SOLID90, SOLID95, SOLID96, SOLID97, SOLID117, HF120, SOLID122, FLUID142, 和 SOLID186。ANSYS 对除此以外的任何单元都不支持过渡的棱锥单元。

（2）设置网格划分时，激活过渡单元表面想让三维单元退化。激活过渡单元（默认）的方法如下：

命令：MOPT,PYRA,ON。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

生成退化三维单元的方法如下：

命令：MSHAPE,1,3D。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

4.3.10 将退化的四面体单元转化为非退化的形式

在模型中生成过渡的棱锥单元之后，可将模型中的 20 节点退化四面体单元转化成相应的 10 节点非退化单元，方法如下：

命令：TCHG,ELEM1,ELEM2,ETYPE2。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Change Tets。

不论是使用命令方法还是 GUI 路径，都将按表 4-2 转换合并的单元。

表 4-2 允许 ELEM1 和 ELEM2 单元合并

物理特性	ELEM1	ELEM2
结构	SOLID95 or 95	SOLID92 or 92
热学	SOLID90 or 90	SOLID87 or 87
静电学	SOLID122 or 122	SOLID123 or 123

执行单元转化的好处在于：节省内存空间，加快求解速度。

4.3.11 执行层网格划分

ANSYS 程序的层网格划分功能（当前只能对二维面）能生成线性梯度的自由网格：

（1）沿线只有均匀的单元尺寸（或适当的变化）。

（2）垂直于线的方向单元尺寸和数量有急剧过渡。

这样的网格适于模拟 CFD 边界层的影响以及电磁表面层的影响等。

可以通过 ANSYS GUI 也可以通过命令对选定的线设置层网格划分控制。如果用 GUI 路径，则选择 Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool，显示网格划分工具控制器，单击“Layer”相邻的设置按钮打开选择线的对话框，接下来是“Area Layer Mesh Controls on Picked Lines”对话框，可在其上指定：单元尺寸（SIZE）和线分割数（NDIV），线间距比率（SPACE），内部网格的厚度（LAYER1）和外部网格的厚度（LAYER2）。

“LAYER1”的单元是均匀尺寸的，等于在线上给定的单元尺寸；“LAYER2”的单元尺寸会从“LAYER1”的尺寸缓慢增加到总体单元的尺寸；另外，“LAYER1”的厚度可以用数值指定也可以利用尺寸系数（表示网格层数），如果是数值，则应该大于或等于给定线的单元尺寸，如果是尺寸系数，则应该大于 1，图 4-15 表示层网格的实例。

如果想删除选定线上的层网格划分控制，选择网格划分工具控制器上包含“Layer”的清除按钮即可。也可用“LESIZE”命令定义层网格划分控制和其他单元特性。

用下列方法可查看层网格划分尺寸规格：

命令：LLIST。

GUI：Utility Menu > List > Lines。

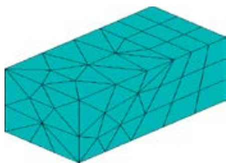


图 4-14 过渡网格实例

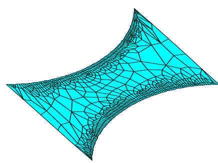


图 4-15 层网格实例

4.4 自由网格划分和映射网格划分控制

4.4.1 自由网格划分

自由网格划分操作，对实体模型无特殊要求。任何几何模型，尽管是不规则的，也可以进行自由网格划分。所用单元形状依赖于是对面还是对体进行网格划分，对面时，自由网格可以是四边形，也可以是三角形，或两者混合；对体时，自由网格一般是四面体单元，棱锥单元作为过渡单元也可以加入到四面体网格中。

如果选择的单元类型严格的限定为三角形或四面体（例如 PLANE2 和 SOLID92），程序划分网格时只用这种单元。但是，如果选择的单元类型允许多于一种形状（例如 PLANE82 和 SOLID95），可通过下列方法指定用哪一种（或几种）形状：

命令：MSHAPE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

另外还必须指定对模型用自由网格划分：

命令：MSHKEY,0。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts。

对于支持多于一种形状的单元，默认地会生成混合形状（通常时四边形单元占多数）。可用“MSHAPE,1,2D 和 MSHKEY,0”来要求全部生成三角形网格。

可能会遇到全部网格都必须为四边形网格的情况。当面边界上总的线分割数为偶数时，面的自由网格划分会全部生成四边形网格，并且四边形单元质量还比较好。通过打开“SmartSizing”项并让它来决定合适的单元数，可以增加面边界线的缝总数为偶数的几率（而不是通过 LESIZE 命令人工设置任何边界划分的单元数）。应保证四边形分裂项关闭“MOPT,SPLIT,OFF”，以使 ANSYS 不将形状较差的四边形单元分裂成三角形。

使体生成一种自由网格，应当选择只允许一种四面体形状的单元类型，或利用支持多种形状的单元类型并设置四面体一种形状功能“MSHAPE,1,3D 和 MSHKEY,0”。

对自由网格划分操作，生成的单元尺寸依赖于 DESIZ3E、ESIZE、KESIZE 和 LESIZE 的当前设置。如果“SmartSizing”打开，单元尺寸将由 AMRTSIZE 及 ESZIE、DESIZE 和 LESIZE 决定，对自由网格划分推荐使用“SmartSizing”。

另外，ANSYS 程序有一种成为扇形网格划分的特殊自由网格划分，适于涉及 TARGE170 单元对三边面进行网格划分的特殊接触分析。当三个边中有两个边只有一个单元分割数，另外一边有任意单元分割数，其结果成为扇形网格，如图 4-16 所示。

记住，使用扇形网格必须满足下列条件：

必须对三边面进行网格划分，其中两边必须只分一个网格，第三边分任何数目。

必须使用“TARGE170”单元进行网格划分。

必须使用自由网格划分。

4.4.2 映射网格划分

映射网格划分要求面或体有一定的形状规则，它可以指定程序全部用四边形面单元、三角形面单元或者六面体单元生成网格模型。

对映射网格划分，生成的单元尺寸依赖于 DESIZE 及 ESIZE、KESZIE、LESIZE 和 AESIZE 的设置（或相应 GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > option）。

SmartSizing（SMRTSIZE）不能用于映射网格划分，硬点不支持映射网格划分。

1．面映射网格划分

面映射网格包括全部是四边形单元或者全部是三角形单元，面映射网格须满足以下条件：

（1）该面必须是 3 条边或者 4 条边（有无连接均可）。

（2）如果是 4 条边，面的对边必须划分为相同数目的单元，或者是划分一过渡型网格。如果是 3 条边，则线分割总数必须为偶数且每条边的分割数相同。

（3）网格划分必须设置为映射网格。图 4-17 所示为一面映射网格的实例。

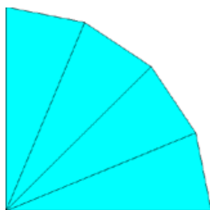


图 4-16 扇形网格划分实例

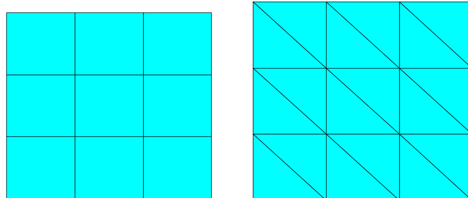


图 4-17 面映射网格

如果一个面多于 4 条边，不能直接用映射网格划分，但可以是某些线合并或者连接是总线数减少到 4 条之后再用映射网格划分，如图 4-18 所示，方法如下：

1）连接线：

命令：LCCAT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > Concatenate > Lines。

2）合并线：

命令：LCOMB。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Lines。

须指出的是，线、面或体上的关键点将生成节点，因此，一条连接线至少有线上已定义的关键点数同样多的分割数，而且，指定的总体单元尺寸（ESIZE）是针对原始线，而不是针对连接线，如图 4-19 所示。不能直接给连接线指定线分割数，但可以对合并线（LCOMB）指定分割数，所以通常来说，合并线比连接线有一些优势。

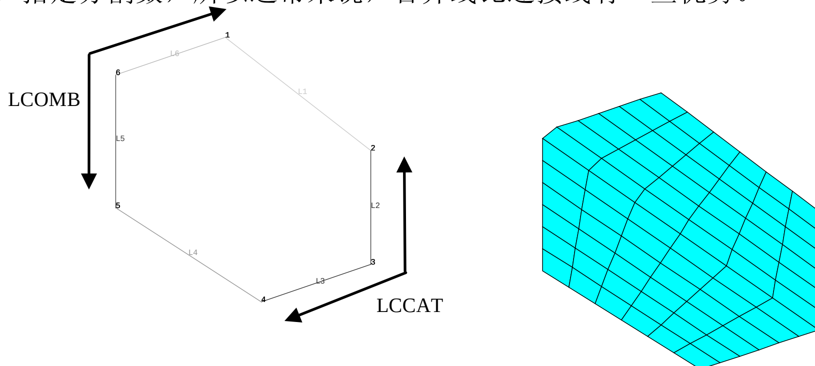


图 4-18 合并和连接线进行映射网格划分

命令 AMAP（GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > By Corners）提供了获得映射网格划分的最便捷途径，它使用所指定的关键点作为角点并

连接关键点之间的所有线，面自动地全部用三角形或四边形单元进行网格划分。

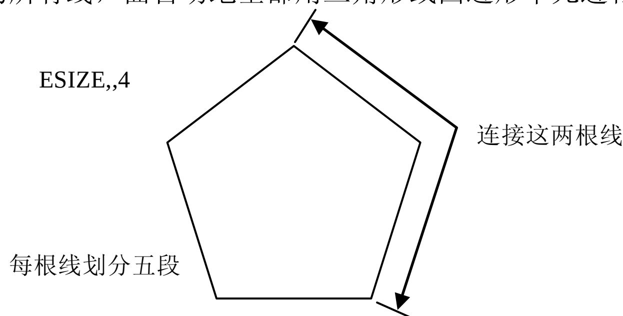


图 4-19　ESIZE 针对原始线而不是连接线示意图

考察前面连接的例子，现利用“AMAP”方法进行网格划分。注意到在已选定的几个关键点之间有多条线，在选定面之后，已按任意顺序拾取关键点 1、3、4 和 6，则得到映射网格如图 4-20 所示。

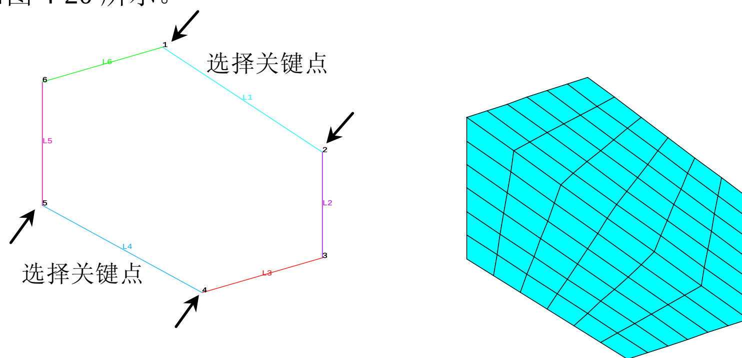


图 4-20　AMAP 方法得到映射网格

另一种生成映射面网格的途径是指定面的对边的分割数，以生成过渡映射四边形网格，如图 4-21 所示。须指出的是，指定的线分割数必须与图 4-22 和图 4-23 所示的模型相对应。

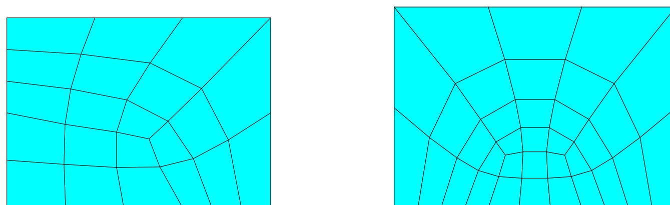


图 4-21　过渡映射网格

除了过渡映射四边形网格之外，还可以生成过渡映射三角形网格。为生成过渡映射三角形网格，必须使用支持三角形的单元类型，且须设定为映射划分（MSHKEY,1），并指定形状为容许三角形（MSHAPE，1，2D）。实际上，过渡映射三角形网格的划分是在过渡映射四边形网格划分的基础上自动的将四边形网格分割成三角形，如图 4-24 所示，所以，各边的线分割数目依然必须满足图 4-22 和图 4-23 所示的模型。

2. 体映射网格划分

要将体全部划分为六面体单元，必须满足以下条件：

（1）该体的外形应为块状（6 个面）、楔形或棱柱（5 个面）、四面体（4 个面）。

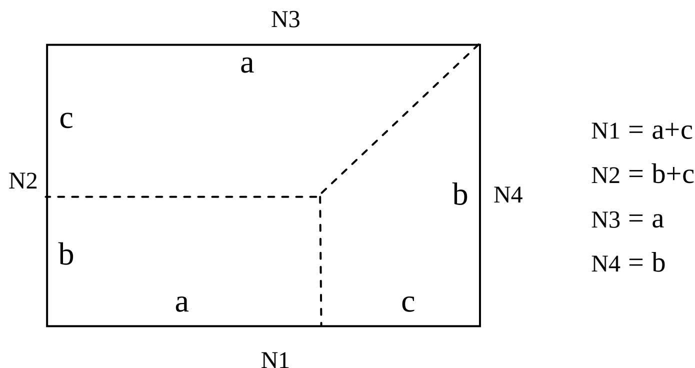


图 4-22 过渡四边形映射网格的线分割模型（1）

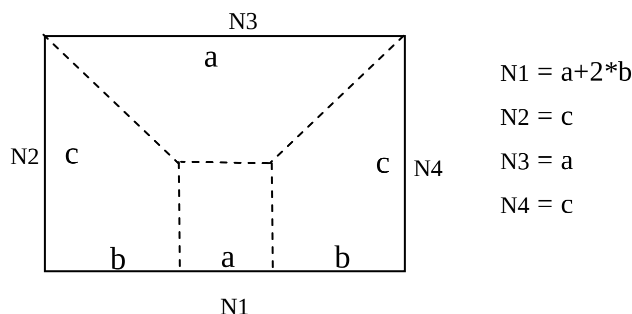


图 4-23 过渡四边形映射网格线分割模型（2）

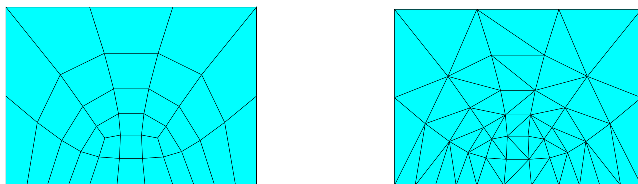


图 4-24 过渡映射三角形网格示意图

（2）对边上必须划分相同的单元数，或分割符合过渡网格形式适合六面体网格划分。

（3）如果是棱柱或者四面体，三角形面上的单元分割数必须是偶数。

图 4-25 所示为映射体网格划分示例。

与面网格划分的连接线一样，当需要减少围成体的面数以进行映射网格划分时，可以对面进行加（AADD）或者连接（ACCAT）。如果连接面有边界线，线也必须连接在一起，必须线连接面，再连接线，举例如下（命令流格式）：

```
! first, concatenate areas for mapped volume meshing:
ACCAT,...
! next, concatenate lines for mapped meshing of bounding areas:
LCCAT,...
```

```
LCCAT,...
VMESH,...
```

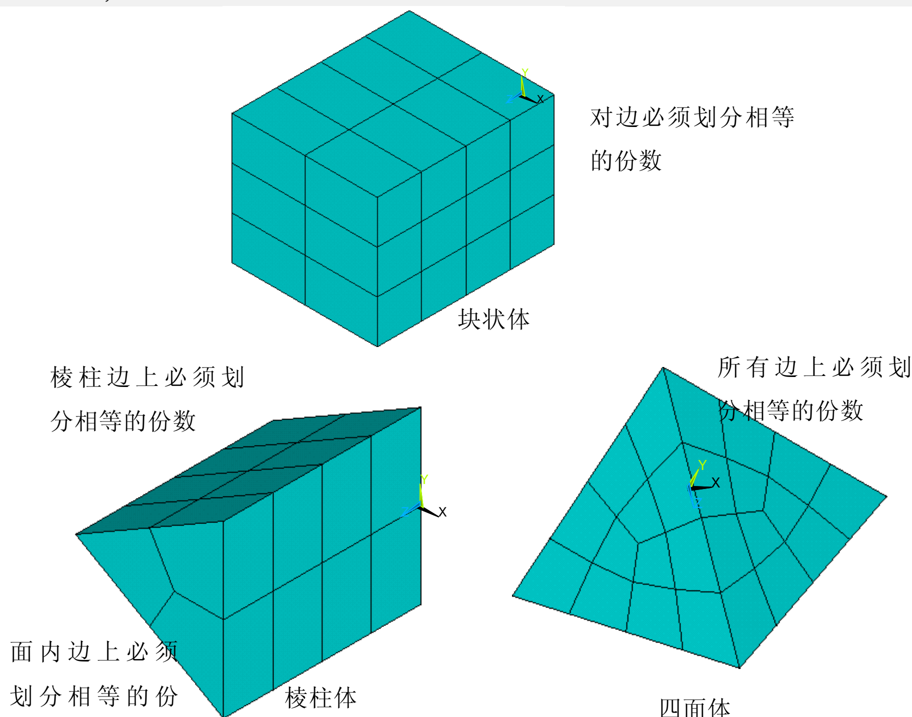


图 4-25 映射体网格划分示例

说明：一般来说，AADD（面为平面或者共面时）的连接效果优于 ACCAT。

如上所述，在连接面（ACCAT）之后一般需要连接线（LCCAT），但是，如果相连接的两个面都是由 4 条线组成（无连接线），则连接线操作会自动进行，如果 4-26 所示。另外须注意，删除连接面并不会自动删除相关的连接线。

连接面的方法：

命令：ACCAT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Areas。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped。

将面相加的方法：

命令：AADD。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Areas。

ACCAT 命令不支持用 IGES 功能输入的模型，但是，可用“ARMERGE”命令合并由 CAD 文件输入模型的两个或更多面。而且，当以此方法使用 ARMERGE 命令时，在合并线之间删除了关键点的位置而不会有节点。

与生成过渡映射面网格类似，ANSYS 程序允许生成过渡映射体网格。过渡映射体网格的划分只适合与 6 个面的体（有无连接面均可），如图 4-27 所示。

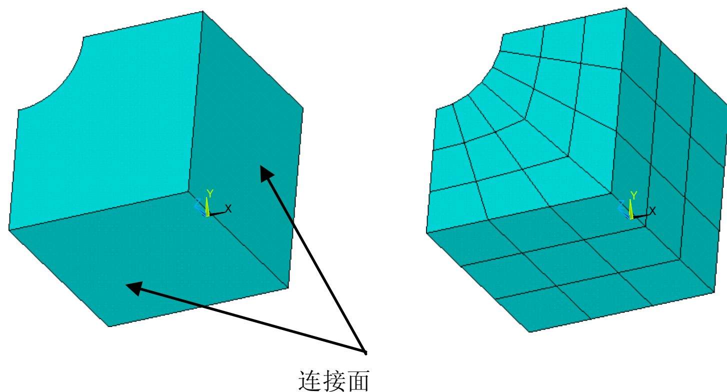


图 4-26 该情况下，连接线操作自动进行

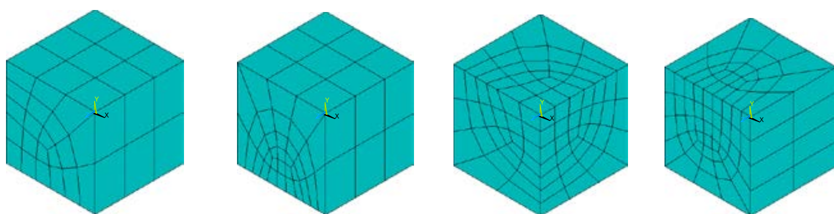


图 4-27 过渡映射体网格示例

4.5 给实体模型划分有限元网格

构造好几何模型，定义了单元属性和网格划分控制之后，即可生成有限元网格了，通常建议在划分网格之前先保存模型：

命令：SAVE。

GUI：Utility Menu > File > Save as Jobname.db。

4.5.1 用xMESH命令生成网格

为对模型进行网格划分，必须使用适合于待划分网格图元类型的网格化分操作，对关键点、线、面和体分别使用下列命令和 GUI 途径进行网格划分：

（1）在关键点处生成点单元(如 MASS21):

命令：KMESH。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Keypoints。

（2）在线上生成线单元（如 LINK31）：

命令：LMESH。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines。

（3）在面上生成面单元（如 PLANE82）：

命令：AMESH, AMAP。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Target Surf。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > By Corners。

（4）在体上生成体单元（如 SOLID90）：

命令：VMESH。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Free。

（5）在分界线或者分界面处生成单位厚度的界面单元（如 INTER192）：

命令：IMESH。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Interface Mesh > 2D Interface。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Interface Mesh > 3D Interface。

另外还需说明的是，使用“xMESH”命令有如下几点注意事项：

（1）有时需要对实体模型用不同维数的多种单元划分网格。例如，带筋的壳有梁单元（线单元）和壳单元（面单元），另外还有用表面作用单元（面单元）覆盖于三维实体单元（体单元）。这种情况可按任意顺序使用相应的网格划分操作（KMESH、LMESH、AMESH 和 VMESH），只需在划分网格之前设置合适的单元属性。

（2）无论选取何种网格划分器（MOPT，VMESH，Value），在不同的硬件平台上对同一模型划分可能会得到不同的网格结果，这是正常的。

4.5.2 生成带方向节点的梁单元网格

可定义方向关键点作为线的属性对梁进行网格划分，方向关键点与待划分的线是独立的，在这些关键点位置处，ANSYS 会沿着梁单元自动生成方向节点。支持这种方向节点的单元有：BEAM4、BEAM24、BEAM44、BEAM161、BEAM188 和 BEAM189。定义方向关键点的方法如下：

命令：LATT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines。

如果一条线由两个关键点（KP1 和 KP2）组成且两个方向关键点（KB 和 KE）已定义为线的属性，方向矢量在线的开始出 KP1 延伸到 KB，在线的末端从 KP2 延伸到 KE。ANSYS 通过上面给定两个方向矢量的插入方向来计算方向节点。如图 4-28～图 4-31 所示。

下面简单介绍定义带方向节点梁单元的 GUI 菜单路径：

（1）选择菜单路径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines，弹出“Line Attributes”对话框，如图 4-32 所示，在其中选择相应材料号（MAT）、

实常数号（REAL）、单元类型号（TYPE）和梁截面号（SECT），然后在“Pick Orientation Keypoints”后面单击使其显示为“Yes”，单击“OK”按钮。继续弹出选择关键点对话框，选择适当的关键点作为方向关键点。

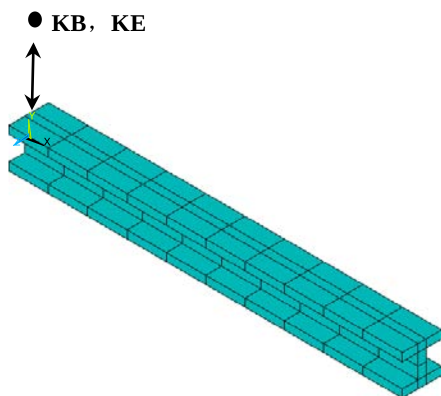


图 4-28 梁方向关键点示意图（1）

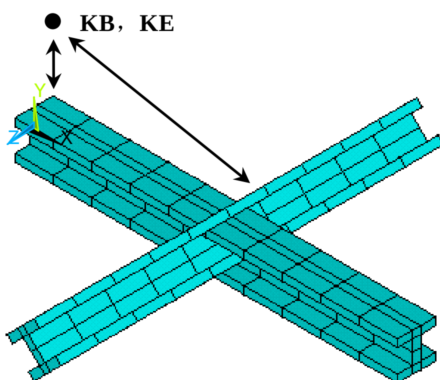


图 4-29 梁方向关键点示意图（2）

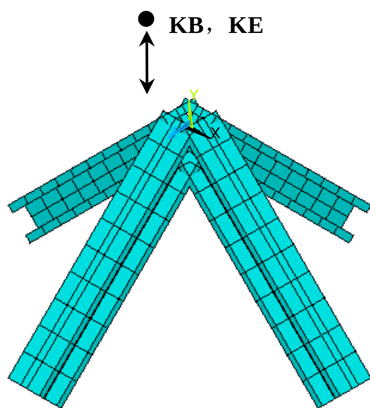


图 4-30 梁方向关键点示意图（3）

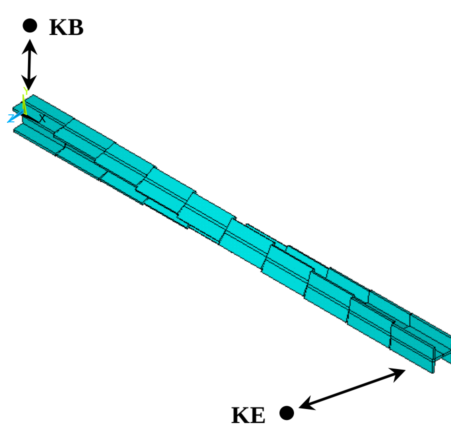


图 4-31 梁方向关键点示意图（4）

第一个选中的关键点将作为 KB，第二个将作为 KE，如果只选择了一个，那么 KE=KB。这之后就可以按普通的梁那样划分梁单元，在此不详述。



图 4-32 “Line Attributes”对话框

（2）如果想屏幕显示带方向点的梁单元，选择菜单路径：Utility Menu > PlotCtrls >

Style > Size and Shape，弹出“Size and Shape”对话框，如图 4-33 所示，在“ESHAPE”后面单击“On”，单击“OK”按钮，屏幕即会显示类似图 4-31 所示的梁单元。

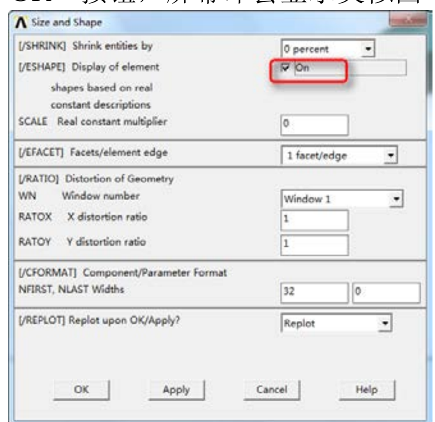


图 4-33 “Size and Shape”对话框

4.5.3 在分界线或者分界面处生成单位厚度的界面单元

为了真实模拟模型的接缝，有时候必须划分界面单元，可以用线性的或者非线性的 4-D 或者 3-D 分界面单元在结构单元之间的接缝层划分网格。图 4-34 表示一个接缝模型的实例，下面针对该模型简单介绍一下如何划分界面网格：

（1）定义相应的材料属性和单元属性。

（2）利用 AMESH 或者 VMESH（或者相应的 GUI 路径）给包含源面（图 4-34 中的 Sourceface）的实体划分单元。

（3）利用 IMESH，LINE 或者 IMESH，AREA 或者 VDRAG 命令（或者相应的 GUI 路径）给接缝处（即分界层）划分单元。

（4）利用 AMESH 或者 VMESH（或者相应的 GUI 路径）给包含目标面（图 4-34 中的 Target face）的实体划分单元。

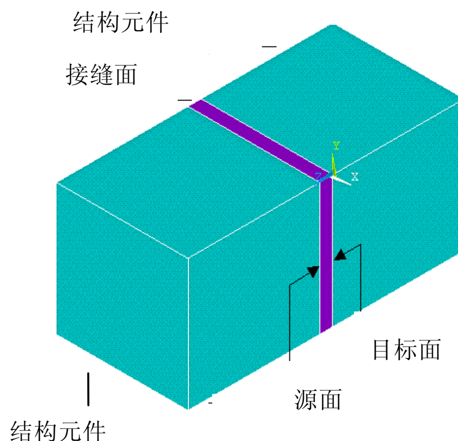


图 4-34 分界面处的网格划分

4.6 延伸和扫略生成有限元模型

下面介绍一些相对上述方法而言更为简便的划分网格模式—延伸、旋转和扫略生成有限元网格模型。其中延伸方法主要用于利用二维模型和二维单元生成三维模型和三维单元，如果不指定单元，那么就只会生成三维几何模型，有时候它可以成为布尔操作的替代方法，而且通常更简便。扫略方法是利用二维单元在已有的三维几何模型上生成三维单元，该方法对于从 CAD 中输入的实体模型通常特别有用。显然，延伸方法与扫略方法最大的区别在于：前者能在二维几何模型的基础上生成新的三维模型同时划分好网格，而后者必须是在完整的几何模型基础上来划分网格。

4.6.1 延伸（Extrude）生成网格

先用下面方法指定延伸（Extrude）的单元属性，如果不指定的话，后面的延伸操作都只会产生相应的几何模型而不会划分网格，另外值得注意的是：如果想生成网格模型，则在源面（或者线）上必须划分相应的面网格（或者线网格）：

命令：EXTOPT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Elem Ext Opts。

弹出“Element Extrusion Options”对话框，如图 4-35 所示，指定想要生成的单元类型（TYPE）、材料号（MAT）、实常数（REAL）、单元坐标系（ESYS）、单元数（VAL1）、单元比率（VAL2），以及指定是否要删除源面（ACLEAR）。

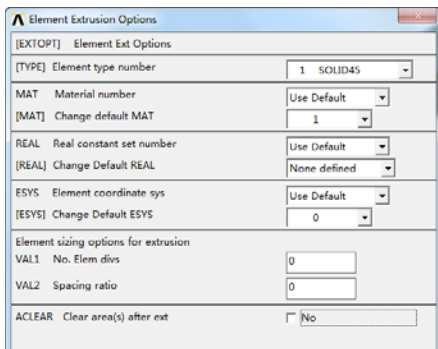


图 4-35 “Element Extrusion Options”对话框

用以下命令可以执行具体的延伸操作：

（1）面沿指定轴线旋转生成体：

命令：VROTATE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > About Axis。

（2）面沿指定方向延伸生成体：

命令：VEXT。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > By XYZ Offset。

（3）面沿其法线生成体：

命令：VOFFST。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal。

另外须提醒，当使用VEXT或者相应GUI的时候，弹出"Extrude Areas by XYZ Offset"对话框，如图4-36所示，其中"DX，DY，DZ"表示延伸的方向和长度，而"RX，RY，RZ"表示延伸时的放大倍数，结果如图4-37所示。

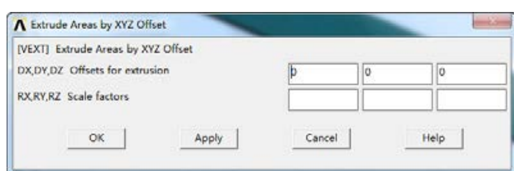


图4-36 "Extrude Areas by XYZ Offset"对话框

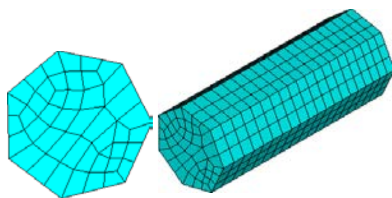


图4-37 将网格面延伸生成网格体

（4）面沿指定路径延伸生成体：

命令：VDRAG。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Lines。

（5）线沿指定轴线旋转生成面：

命令：AROTATE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > About Axis。

（6）线沿指定路径延伸生成面：

命令：ADRAG。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines。

（7）关键点沿指定轴线旋转生成线：

命令：LROTATE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints > About Axis。

（8）关键点沿指定路径延伸生成线：

命令：LDRAG。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints > Along Lines。

如果不在"EXTOPT"中指定单元属性，那么上述方法只会生成相应的几何模型，有时候可以将它们作为布尔操作的替代方法，如图4-38所示，可以将空心球截面绕直径

旋转一定角度直接生成。

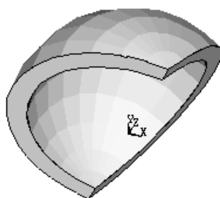


图 4-38 用延伸方法生成空心圆球

4.6.2 扫略（VSWEEP）生成网格

（1）确定体的拓扑模型能够进行扫略，如果是下列情况之一则不能扫略：体的一个或多个侧面包含多于一个环；体包含多于一个壳；体的拓扑源面与目标面不是相对的。

（2）确定已定义合适的二维和三维单元类型、例如，如果对源面进行预网格划分，并想扫略成包含二次六面体的单元，应当先用二次二维面单元对源面划分网格。

（3）确定在扫略操作中如何控制生成单元层数，即沿扫略方向生成的单元数。可用如下方法控制：

命令：EXTOPT，ESIZE，Val1，Val2。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep Opts。

弹出“Sweep Options”对话框，如图 4-39 所示。框中各项的意义一次如下：是否清除源面的面网格，在无法扫略处是否用四面体单元划分网格，程序自动选择源面和目标面还是手动选择，在扫略方向生成多少单元数，在扫略方向生成的单元尺寸比率。其中关于源面，目标面，扫略方向和生成单元数的含义如图 4-40 所示。

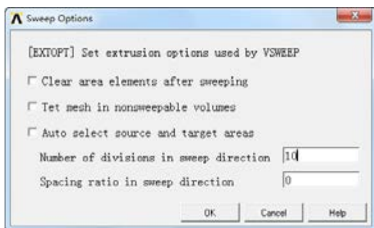


图 4-39 “Sweep Options”对话框

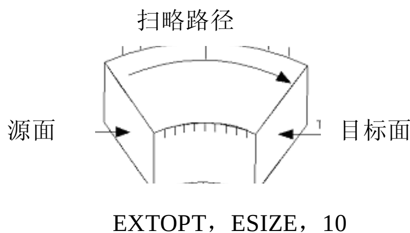


图 4-40 扫略的示意图

（4）确定体的源面和目标面。ANSYS 在源面上使用的是面单元模式（三角形或者四边形），用六面体或者楔形单元填充体。目标面是仅与源面相对的面。

（5）有选择的对源面、目标面和边界面划分网格。

体扫略操作的结果会因在扫略前是否对模型的任何面（源面、目标面和边界面）划分网格而不同。典型情况是在扫略之前对源面划分网格，如果不划分，则 ANSYS 程序会自动生成临时面单元，在确定了体扫略模式之后就会自动清除。

在扫略前确定是否预划分网格应当考虑以下因素：

（1）如果想让源面用四边形或者三角形映射网格划分，那么应当预划分网格。

（2）如果想让源面用初始单元尺寸划分网格，那么应当预划分。

（3）如果不预划分网格，ANSYS 通常用自由网格划分。

（4）如果不预划分网格，ANSYS 使用有“MSHAPE”设置的单元形状来确定对源面的网格划分。“MSHAPE，0，2D”生成四边形单元，“MSHAPE，1，2D”生成三角形单元。

（5）如果与体关联的面或者线上出现硬点则扫略操作失败，除非对包含硬点的面或者线预划分网格。

（6）如果源面和目标面都进行预划分网格，那么面网格必须相匹配。不过，源面和目标面并不要求一定都划分成映射网格。

（7）在扫略之前，体的所有侧面（可以有连接线）必须是映射网格划分或者四边形网格划分，如果侧面为划分网格，则必须有一条线在源面上，还有一条线在目标面上。

（8）有时候，尽管源面和目标面的拓扑结构不同，但扫略操作依然可以成功，只需采用适当的方法即可。如图 4-41 所示，将模型分解成两个模型，分别从不同方向扫略就可生成合适的网格。

可用如下方法激活体扫略：

命令：VSWEEP，VNUM，SRCA，TRGA,LSMO。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep。

如果用“VSWEEP”命令扫略体，须指定下列变量值：待扫略体（VNUM）、源面（SRCA）、目标面（TRGA），另外可选用“LSMO”变量指定 ANSYS 在扫略体操作中是否执行线的光滑处理。如果采用 GUI 途径，则按下列步骤：

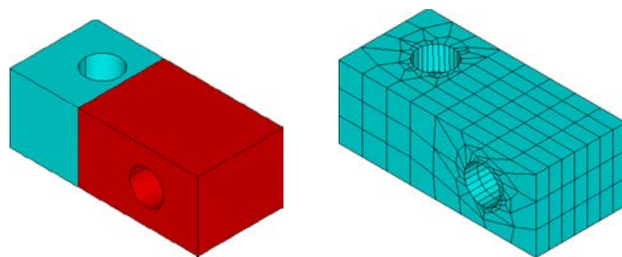


图 4-41 扫略相邻体

（1）选择菜单途径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep，弹出体扫略选择框。

（2）选择待扫略的体并单击“Apply”按钮。

（3）选择源面并单击“Apply”按钮。

（4）选择目标面，单击“OK”按钮。

图 4-42 所示是一个体扫略网格的实例，图 4-42a、c 表示没有预网格直接执行体扫略的结果，图 4-42b、d 表示在源面上划分映射预网格然后执行体扫略的结果，如果觉得这两种网格结果都不满意，则可以考虑图 4-42e、f、g 形式，步骤如下：

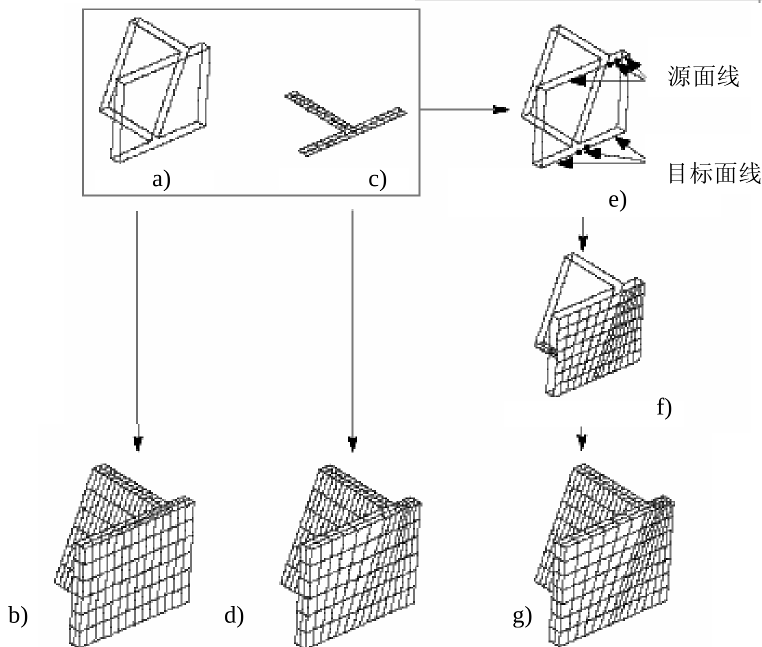


图 4-42 体扫略网格示意图

（1）清除网格（VCLEAR）。

（2）通过在想要分割的位置创建关键点来对源面的线和目标面的线进行分割（LDIV），如图 4-42e 所示。

（3）按图 4-42e 将源面上增线的线分割复制到目标面的相应新增线上（新增线是步骤 2 产生的）。该步骤可以通过网格划分工具实现，菜单途径：Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool。

（4）手工对步骤（2）修改过的边界面划分映射网格，如图 4-42f 所示。

（5）重新激活和执行体扫略，结果如图 4-42g 所示。

4.7 修正有限元模型

本节主要叙述一些常用的修改有限元模型的方法，主要包括：

（1）局部细化网格。

（2）移动和复制节点和单元。

（3）控制面、线和单元的法向。

（4）修改单元属性。

4.7.1 局部细化网格

通常碰到下面两种情况时，需要考虑对局部区域进行网格细化：

（1）已经将一个模型划分了网格，但想在模型的指定区域内得到更好的网格。

（2）已经完成分析，同时根据结果想在感兴趣的区域得到更精确的解。

对于由四面体组成的体网格，ANSYS 程序允许在指定的节点、单元、关键点、线或者面的周围进行局部细化网格，但非四面体单元（例如六面体、楔形、棱锥等）不能进行局部细化网格。

下面具体介绍利用命令或者相应 GUI 菜单途径来进行网格细化并设置细化控制：

（1）围绕节点细化网格：

命令：NREFINE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Nodes。

（2）围绕单元细化网格：

命令：EREFINE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Elements。

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > All。

（3）围绕关键点细化网格：

命令：KREFINE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Keypoints。

（4）围绕线细化网格：

命令：LREFINE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Lines。

（5）围绕面细化网格：

命令：AREFINE。

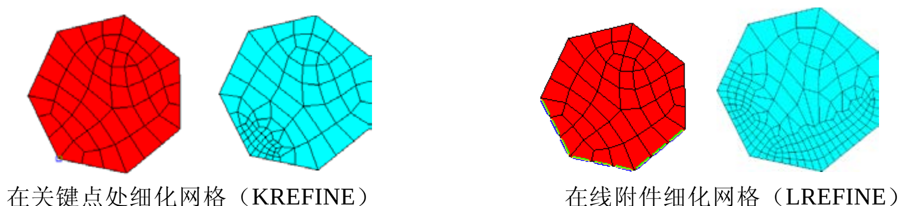
GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Areas。

图 4-43～图 4-46 所示为一些网格细化的范例。从图中可以看出，控制网格细化时常用的 3 个变量为：LEVEL、DEPTH 和 POST。下面对 3 个变量作分别介绍，在此之前，先介绍在何处定义这 3 个变量值。



在节点处细化网格（NREFINE）　　在单元处细化网格（EREFINE）

图 4-43　网格细化范例（1）



在关键点处细化网格（KREFINE）　　在线附件细化网格（LREFINE）

图 4-44　网格细化范例（2）

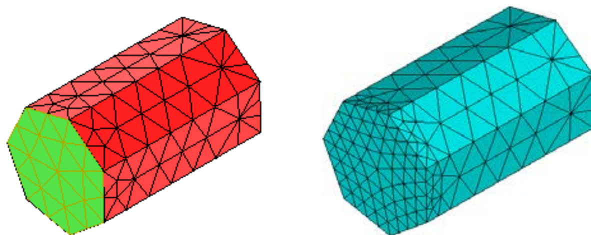
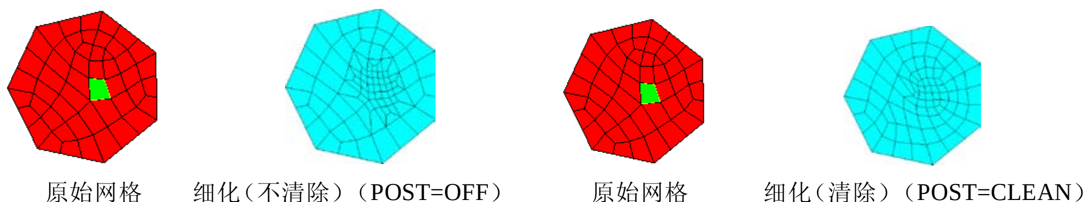


图 4-45　网格细化范例（3）



原始网格　　细化（不清除）（POST=OFF）　　原始网格　　细化（清除）（POST=CLEAN）

图 4-46　网格细化范例（4）

以用菜单路径围绕节点细化网格为例：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Nodes。

弹出拾取节点对话框，在模型上拾取相应节点，弹出“Refine Mesh at Node”对话框，如图 4-47 所示，在“LEVEL”后面的下拉列表选择合适的数值作为“LEVEL”值，单击“Advanced options”后面使其显示为“Yes”，单击“OK”按钮，弹出“Refine mesh at nodes advanced options”对话框，如图 4-48 所示，在“DEPTH”后面输入相应数值，在“POST”后面选择相应选项，其余默认，单击“OK”按钮即可执行网格细化操作。

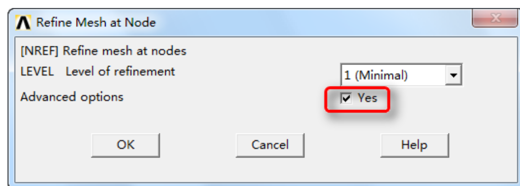


图 4-47　局部细化网格对话框（1）

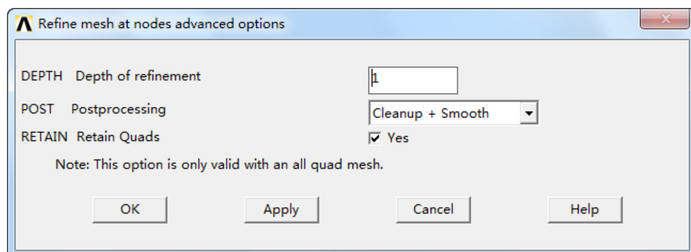


图 4-48　局部细化网格对话框（2）

下面对 3 个变量分别解释。LEVEL 变量用来指定网格细化的程度，它必须是从 1 到 5 的整数，1 表示最小程度的细化，其细化区域单元边界的长度大约为原单元边界长度的 1/2，5 表示最大程度的细化，其细化区域单元边界的长度大约为原单元边界长度的 1/9，其余值的细化程度如表 4-3 所示。

表 4-3 细化程度

LEVEL 值	细化后单元跟原单元边长的比值
1	1/2
2	1/3
3	1/4
4	1/8
5	1/9

DEPTH 变量表示网格细化的范围，默认 DEPTH=0，表示只细化选择点（或者单元、线、面等）处一层网格，当然，DEPTH=0 时也可能细化一层之外的网格，那只是因为网格过渡的要求所致。

POST 变量表示是否对网格细化区域进行光滑和清理处理。光滑处理表示调整细化区域的节点位置以改善单元形状，清理处理表示 ANSYS 程序对那些细化区域或者直接与细化区域相连的单元执行清理命令，通常可以改善单元质量。默认情况是进行光滑和清理处理。

4.7.2 移动和复制节点和单元

当一个已经划分了网格的实体模型图元被复制时，可以选择是否连同单元和节点一起复制，以复制面为例，在选择菜单路径 Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Areas 之后，将弹出“Copy Areas”对话框，如图 4-49 所示，可以在“NOELEM”后面的下拉列表中选择是否复制单元和节点。

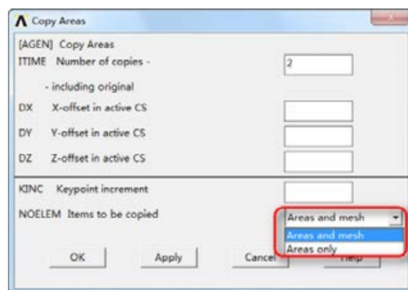


图 4-49 复制面（Copy Areas）的对话框

（1）移动和复制面：

命令：AGEN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Areas。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Areas > Areas。

（2）移动和复制体：

命令：VGEN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes。

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Volumes。

（3）对称映像生成面

命令：ARSYM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Areas。

（4）对称映像生成体：

命令：VSYMM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes。

（5）转换面的坐标系：

命令：ATRAN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Areas。

（6）转换体的坐标系：

命令：VTRAN。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Volumes。

4.7.3 控制面、线和单元的法向

如果模型中包含壳单元，并且加的是面载荷，那么就需要了解单元面以便能对载荷定义正确的方向。通常，壳的表面载荷将加在单元的某一个面上，并根据右手法则（I，J，K，L 节点序号方向，如图 4-50 所示）确定正向。如果是用实体模型面进行网格划分的方法生成壳单元，那么单元的正方向将与面的正方向相一致。

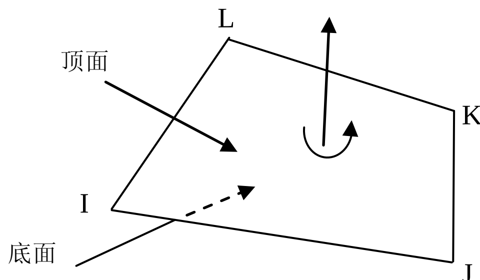


图 4-50 面的正方向

有几种方法来进行图形检查：

（1）壳执行/NORMAL 命令（GUI：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Shell Normals），接着再执行“EPLOT”命令（GUI：Utility Menu > Plot > Elements），该方法可以对壳单元的正法线方向进行一次快速的图形检查。

（2）利用命令“/GRAPHICS，POWER”（GUI：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Hidden-Line Options，如图 4-51 所示）打开“PowerGraphics”的选项（通常该选项是默认打开底），“PowerGraphics”将用不同颜色来显示壳单元的底面和顶面。

（3）用假定正确底表面载荷加到模型上，然后在执行“EPLOT”命令之前先打开显示表面载荷符号的选项[/PSF,Item,Comp,2]（相应 GUI：Utility Menu > PlotCtrls > Symbols）

以检验它们方向的正确性。

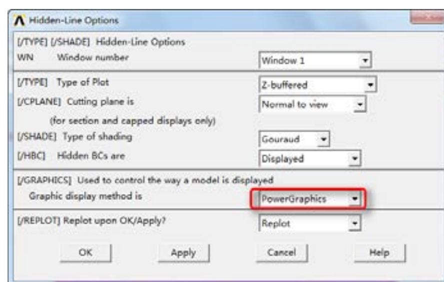


图 4-51 打开“PowerGraphics”选项

有时候需要修改或者控制面、线和单元的法向，ANSYS 程序提供了如下方法：

（1）重新设定壳单元的法向：

命令：ENORM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Elements > Shell Normals。

（2）重新设定面的法向：

命令：ANORM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Areas > Area Normals。

（3）将壳单元的法向反向：

命令：ENSYM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Reverse Normals > of Shell Elems。

（4）将线的法向反向：

命令：LREVERSE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Reverse Normals > of Lines。

（5）将面的法向反向：

命令：AREVERSE。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Reverse Normals > of Areas。

4.7.4 修改单元属性

通常，要修改单元属性时，可以直接删除单元，重新设定单元属性后在执行网格划分操作，这个方法最直观，但通常也是最费时最不方便。下面提供另外一种不必删除网格的简便方法：

命令：EMODIFY。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Elements > Modify

Attrib。

弹出拾取单元对话框，用鼠标在模型上拾取相应单元之后即弹出“Modify Elem Attributes”对话框，如图 4-52 所示，在“STLOC”后面的下拉列表中选择适当选项（例如单元类型，材料号，实常数等），然后在“I1”后面填入新的序号（表示修改后的单元类型号，材料号或者实常数等）。

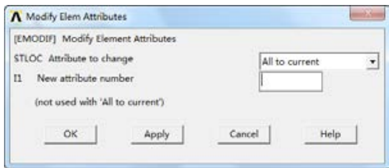


图 4-52 修改单元属性对话框

4.8 直接通过节点和单元生成有限元模型

如前所述，ANSYS 程序已经提供了许多方便的命令用于通过几何模型生成有限元网格模型，以及对节点和单元的复制、移动等操作，但同时，ANSYS 还提供了直接通过节点和单元生成有限元模型的方法，有时候，这种直接方法更便捷更有效。由直接生成法生成的模型严格按节点和单元的顺序定义，单元必须在相应节点全部生成之后才能定义。

4.8.1 节点

（1）定义节点。

（2）从已有节点生成另外的节点。

（3）查看和删除节点。

（4）移动节点。

（5）读写包含节点数据的文本文件。

（6）旋转节点的坐标系。

可以按表 4-4～表 4-9 提供的方法执行上述操作。

表 4-4 旋转节点的坐标系

用法	命令	GUI 菜单路径
旋转到当前激活的坐标系	NROTAT	Main Menu>Preprocessor >Modeling >Create > Nodes >Rotate Node CS>To Active CS Main Menu > Preprocessor>Modeling>Move/Modify > Rotate Node CS > To Active CS
通过方向余弦旋转节点坐标系	NANG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Vectors Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Vectors
通过角度来旋转节点坐标系	N; NMODIF	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS or > On Working Plane Main Menu > Modeling > Preprocessor > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Angles Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Angles or > Set of Nodes or > Single Node

表 4-5 定义节点

用法	命令	GUI 菜单路径
在激活的坐标系里定义单个节点	N	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS or > On Working Plane
在关键点上生成节点	NKPT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > On Keypoint

表 4-6 从已有节点生成另外的节点

用法	命令	GUI 菜单路径
在两节点连线上生成节点	FILL	Main Menu>Preprocessor>Modeling >Create>Nodes > Fill between Nds
由一种模式节点生成另外节点	NGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Nodes > Copy
由一种模式节点生成缩放节点	NSCALE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Nodes > Scale & Copy or > Scale & Move Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Nodes > Scale & Copy or > Scale Move
在三节点的二次线上生成节点	QUAD	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Quadratic Fill
生成镜像映射节点	NSYM	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Nodes
将一种模式的节点转换坐标系	TRANSFER	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Transfer Coord > Nodes
在曲线的曲率中心定义节点	CENTER	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > At Curvature Ctr

表 4-7 查看和删除节点

用法	命令	GUI 菜单路径
列表显示节点	NLIST	Utility Menu > List > Nodes Utility Menu > List > Picked Entities > Nodes
屏幕显示节点	NPLOT	Utility Menu > Plot > Nodes
删除节点	NDELE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Nodes

表 4-8 移动节点

用法	命令	GUI 菜单路径
通过编辑节点坐标来移动节点	NMODIF	Main Menu > Modeling > Preprocessor > Create > Nodes > Rotate Node CS > By Angles Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node CS > By Angles or > Set of Nodes or > Single Node
移动节点到作表面的交点	MOVE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Nodes > To Intersect

表 4-9 读写包含节点数据的文本文件

用法	命令	GUI 菜单路径
从文件中读取一部分节点	NRRANG	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Read Node File
从文件中读取节点	NREAD	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Read Node File
将节点写入文件	NWRITE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Write Node File

4.8.2 单元

（1）组集单元表。

（2）指向单元表中的项。

（3）查看单元列表。

（4）定义单元。

（5）查看和删除单元。

（6）从已有单元生成另外的单元。

（7）利用特殊方法生成单元。

（8）读写包含单元数据的文本文件。

定义单元的前提条件是：已经定义了该单元所需的最少节点并且已指定合适的单元属性。可以按照表 4-10～表 4-17 提供的方法来执行上述操作。

表 4-10 组集单元表

用法	命令	GUI 菜单路径
定义单元类型	ET	Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete
定义实常数	R	Main Menu > Preprocessor > Real Constants
定义线性材料属性	MP;MPDATA;MPTEMP	Main Menu> Preprocessor > Material Props > Material Models > analysis type

表 4-11 指向单元属性

用法	命令	GUI 菜单路径
指定单元类型	TYPE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes
指定实常数	REAL	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes
指定材料号	MAT	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes
指定单元坐标系	ESYS	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes

表 4-12 定义单元

用法	命令	GUI 菜单路径
定义单元	E	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > User Numbered > Thru Nodes

表 4-13 查看单元列表

用法	命令	GUI 菜单路径
列表显示单元类型	ETLIST	Utility Menu > List > Properties > Element Types
列表显示实常数的设置	RLIST	Utility Menu > List > Properties > All Real Constants or > Specified Real Constants
列表显示线性材料属性	MPLIST	Utility Menu > List > Properties > All Materials or > All Matls, All Temps or > All Matls, Specified Temp or > Specified Matl, All Temps
列表显示数据表	TBLIST	Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models Utility Menu > List > Properties > Data Tables
列表显示坐标系	CSLIST	Utility Menu > List > Other > Local Coord Sys

表 4-14 查看和删除单元

用法	命令	GUI 菜单路径
列表显示单元	ELIST	Utility Menu>List > Elements Utility Menu > List > Picked Entities > Elements
屏幕显示单元	EPLOT	Utility Menu > Plot > Elements
删除单元	EDELE	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Elements

表 4-15 从已有单元生成另外的单元

用法	命令	GUI 菜单路径
从已有模式的单元生成另外的单元	EGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered
手工控制编号从已有模式的单元生成另外的单元	ENGEN	Main Menu > Preprocessor>Modeling >Copy>Elements>User Numbered
镜像映射生成单元	ESYM	Main Menu>Preprocessor>Modeling >Reflect >Elements > Auto Numbered
手工控制编号镜像映射生成单元	ENSYM	Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Elements>User Numbered Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Reverse Normals > of Shell Elements

表 4-16 读写包含单元数据的文本文件

用法	命令	GUI 菜单路径
从单元文件中读取部分单元	ERRANG	Main Menu >Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Read Elem File
从文件中读取单元	EREAD	Main Menu >Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Read Elem File
将单元写入文件	EWRITE	Main Menu > Preprocessor >Modeling >Create > Elements > Write Elem File

表 4-17 利用特殊方法生成单元

用法	命令	GUI 菜单路径
在已有单元的外表面生成表面单元（SURF151 和 SURF152）	ESURF	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > option
用表面单元覆盖于平面单元的边界上并分配额外节点作为最近的流体单元节点（SURF151）	LFSURF	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > Surface Effect > Attach to Fluid > Line to Fluid
用表面单元覆盖于实体单元的表面上并分配额外的节点作为最近的流体单元的节点（SURF152）	AFSURF	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > Surf Effect > Attach to Fluid > Area to Fluid
用表面单元覆盖于已有单元的表面并指定额外的节点作为最近的流体单元的节点（SURF151 和 SURF152）	NDSURF	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > Surf Effect > Attach to Fluid > Node to Fluid
在重合位置处产生两节点单元	EINTF	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > At Coincid Nd
产生接触单元	GCGEN	Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > Node to Surf

4.9 编号控制

本节主要叙述用于编号控制（包括关键点、线、面、体、单元、节点、单元类型、实常数、材料号、耦合自由度、约束方程、坐标系等）的命令和 GUI 途径。这种编号控制对于将模型的各个独立部分组合起来是相当有用和必要的。

布尔运算输出图元的编号并非完全可以预估，在不同的计算机系统中，执行同样的布尔运算，其生成图元的编号可能会不同。

4.9.1 合并重复项

如果两个独立的图元在相同或者非常相近的位置，可用下列方法将他们合并成一个图元：

命令：NUMMRG。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items。

弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框，如图 4-53 所示。在 Label 后面选择合适的项（例如关键点、线、面、体、单元、节点、单元类型、时常数、材料号等）；“TOLER”后面的输入值表示条件公差（相对公差），“GTOLER”后面的输入值表示总体公差（绝对公差），通常采用默认值（即不输入具体数值），图 4-54 和图 4-55 给出了两个合并的实例；“ACTION”变量表示是直接合并选择项还是先提示然后再合并（默认是直接合并）；“SWITCH”变量表示是保留合并图元中较高的编号

还是较低的编号（默认是较低的编号）。

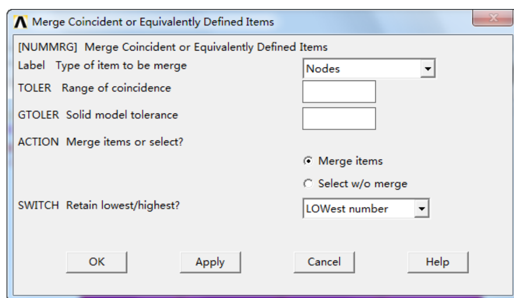


图 4-53　“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框

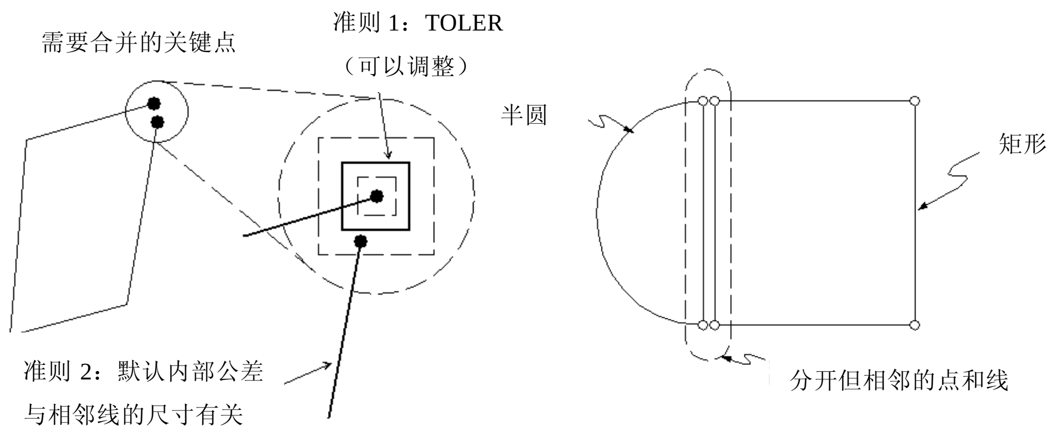


图 4-54 默认的合并公差　　　　图 4-55 合并示例

4.9.2 编号压缩

再构造模型时，由于删除、清除、合并或者其他操作可能在编号中产生许多空号，可采用如下方法清除空号并且保证编号的连续性：

命令：NUMCMP。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers。

弹出“Compress Numbers”对话框，如图 4-56 所示，在“Label”后面的下拉列表中选择适当的项（例如关键点、线、面、体、单元、节点、单元类型、时常数、材料号等）即可执行编号压缩操作。

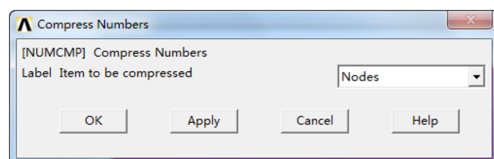


图 4-56　“Compress Numbers”对话框

4.9.3 设定起始编号

在生成新的编号项时，可以控制新生成的系列项的起始编号大于已有图元的最大编号。这样做可以保证新生成图元的连续编号，不会占用已有编号序列中的空号。这样做的另一个理由可以使生成的模型的某个区域在编号上与其他区域保持独立，从而避免将这些区域连接到一块使有编号冲突。设定其实编号的方法如下：

命令：NUMSTR。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Set Start Number。

弹出“Starting Number Specifications”对话框，如图4-57所示，在节点、单元、关键点、线、面后面指定相应的起始编号即可。

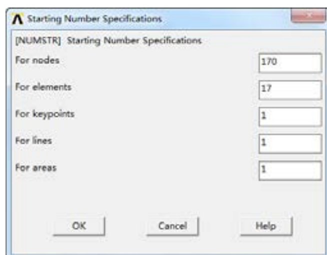


图4-57 “Starting Number Specifications”对话框

如果想恢复默认的起始编号，可用如下方法：

命令：NUMSTR，DEFA。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Reset Start Number。

弹出“Reset Starting Number Specifications”对话框，如图4-58所示，单击“OK”按钮即可。

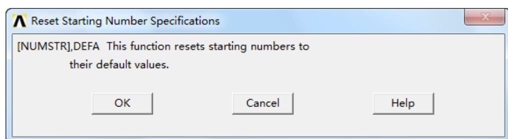


图4-58 “Reset Starting Number Specifications”对话框

4.9.4 编号偏差

在连接模型中两个独立区域时，为避免编号冲突，可对当前已选取的编号加一个偏差值来重新编号，方法如下：

命令：NUMOFF。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Add Num Offset。

弹出“Add an Offset to Item Numbers”对话框，如图4-59所示，在“Label”后面选择想要执行编号偏差的项（例如关键点、线、面、体、单元、节点、单元类型、时常数、材料号等），在“VALUE”后面输入具体数值即可。

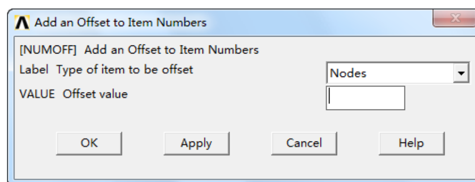


图 4-59 “Add an Offset to Item Numbers”对话框

4.10 实例导航——导弹发动机药柱模型网格划分

前面章节中采用不同的方式对星型药柱进行了几何建模，这一节将在此基础上对星型药柱进行网格划分。首先设定单元属性，由于该问题是药柱受温度和内压载荷作用下的结构分析，所以在这里采用比较简单的 Solid185 单元，该单元是 8 节点且具有 3 个位移自由度的六面体单元。GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，在弹出的对话框中如图 4-60 设置，单击“OK”按钮后在单元列表中可以发现增加了“Solid185”单元。

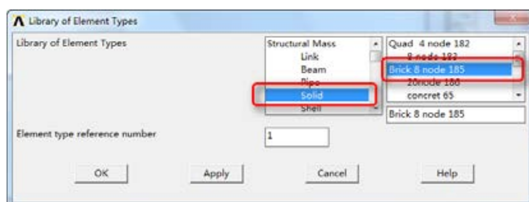


图 4-60 单元设置

接下来设置材料属性，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Material Props > material model，在弹出的如图 4-61 所示对话框中设置材料的线弹性属性，在弹出的如图 4-62 所示的对话框中设置药柱材料的线弹性参数。其中 EX 代表弹性模量，PRXY 代表泊松比。除此之外还需要设定材料的热膨胀系数，如图 4-63 所示，进入热膨胀系数设置，在弹出的图 4-64 中，将参考温度设为 58，热膨胀系数设为“0.652e-4”，单击“OK”按钮后完成材料属性设置。

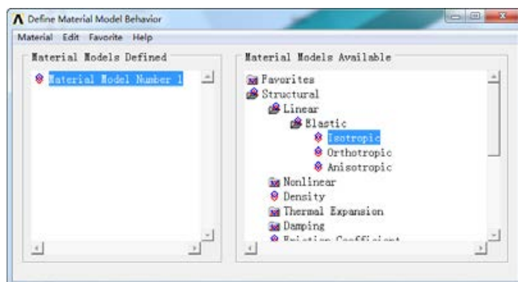


图 4-61 材料属性设置

由于该模型只有药柱一种材料，也只采用一种单元，所以划分网格时系统将默认为将单元 45 和材料 1 分配给药柱模型，接下来将对模型进行划分网格。为了熟悉各种网格划分的方法和流程，我们分别采用了智能分网、自由分网和映射分网 3 种方法。

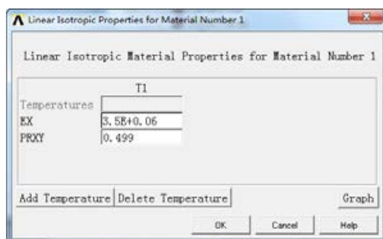


图 4-62 线弹性材料参数输入

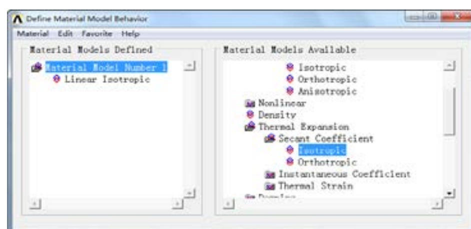


图 4-63 热膨胀系数设置

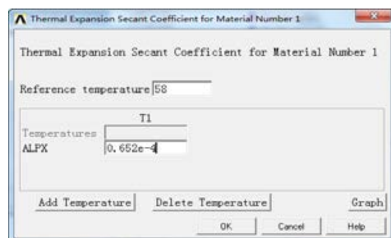


图 4-64 热膨胀系数输入

4.10.1 采用智能分网

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool，在弹出的对话框选中“SmartSize”复选按钮，如图 4-65 所示，默认的为 6，从 1（细网格）到 10（粗网格），程序会自动的设置一系列独立的控制值用来生成想要的大小。初步划分的网格如图 4-66 所示。



图 4-65 “SmartSize”设置

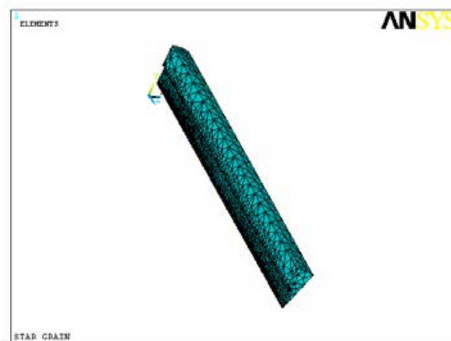


图 4-66 “SmartSize”分网后的模型

另外智能分网还可以采用更高级的设置来控制网格质量，具体参照 2.3.5 节。

智能分网系统会根据模型的尺寸自己设置网格的大小，并在局部区域加密，所以智能程度较高，但是往往不好控制网格的分布大小，划分不出自己所需要的网格。

4.10.2 采用扫略分网

根据之前生成模型的方法，可以先对横截面生成分网，然后再通过“vsweep”方式生成扫略网格。由于横截面的网格单元必须是二维的，所以需再设置一种二维网格单元“Mesh200”，增加单元类型或输入命令“ET,2,Mesh200”。由于三维的网格单元为 8 节点的六面体单元，所以需要对“Mesh200”的属性做如下设置：选中“Mesh200”单元，单击“Option”选项，在弹出的对话框中将“K1”设置成“QUAD 4-NODE”，如图 4-67 所示。我们先用“Mesh200”单元对面 1 进行分网，在这里同样采用两种分网的方式，自由分网和映射分网。

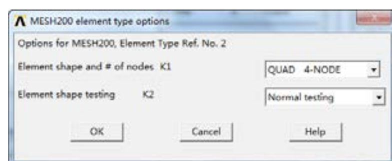


图 4-67 单元选项设置

01 自由分网。

❶设置线的网格大小。在图 4-65 中，单击线网格的设置，选择线 1，单击“OK”按钮，将弹出如图 4-68 所示的线网格控制对话框，将“NDIV”设置成 10（表示将该线划分成 10 份），也可以设置“SIZE”的大小。同样的方法分别将线 2、3、7、6、9 的“SIZE”设置成 0.002，将线 5、10 的“NDIV”分别设置成 10 和 20。至此完成了线的网格大小控制（注：并不是每一条线都需要设置，可以根据自己需要对相应的部位进行控制，因为药柱的内表面是受力严重的部位，所以对该处的网格进行了相应程度的加密）。

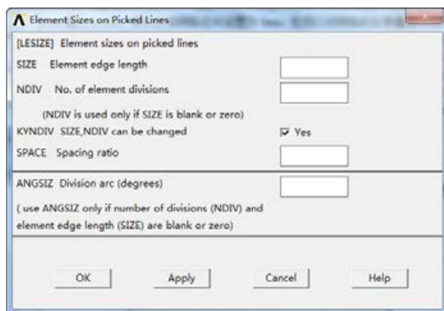


图 4-68 线网格控制对话框

❷设置总体网格大小。在图 4-65 中单击“Global”网格的设置，在弹出的对话框中“SIZE”输入 0.005，表示总体网格边长设置为 5；也可以对网格的总数量进行控制。

❸自由网格划分面。在“MeshTool”对话框中选中“Free”，“Mesh”的对象选择“Areas”，“Shape”选择“Quad“，如图 4-69 所示。然后单击“Mesh”按钮，在屏幕

上选择面 1，即可对面 1 进行自由网格划分，分网后的结果如图 4-70 所示。因为重点需要研究药柱内表面的结构，所以对其进行了相应程度的加密，如果对网格不满意，可以重新设置网格的大小，或者在内表面进行局部细化网格（如图 4-71 所示）。GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Lines，具体操作过程可见 2.7.1 节。

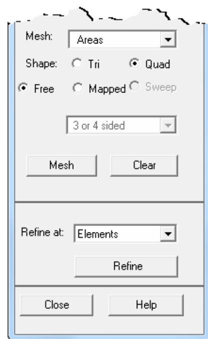


图 4-69 自由网格设置

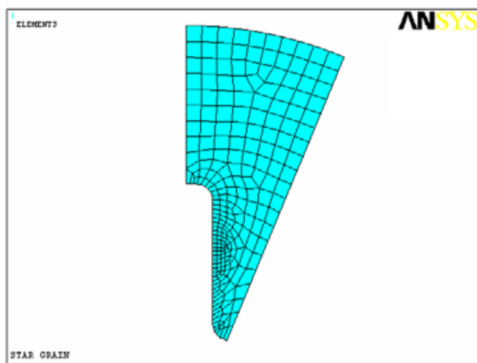


图 4-70 自由网格分网后结果

❹扫略生成体网格。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep Opts，在弹出的对话框设置在扫略的方向上分成 50 份。单击“OK”按钮后，先选择体 1，然后选择源面（面 1），单击“Apply”按钮，再选择目标面（面 10），单击“OK”按钮，将在体 1 上生成扫略网格，如图 4-72 所示。

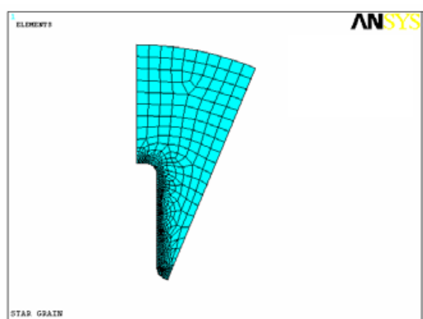


图 4-71 内表面局部细化后的分网

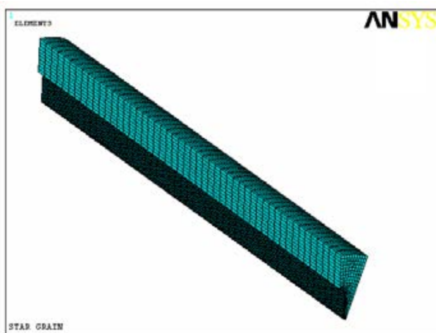


图 4-72 自由分网扫略后的结果

❺编号压缩。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers，弹出“Compress Numbers”对话框，在“Label”后面的下拉列表中选择“All”，单击“OK”按钮即可，如图 4-73 所示。

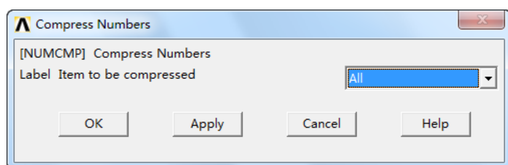


图 4-73 编号压缩

扫略分网（自由分网）命令流：

```
/PREP7
!定义结构分析材料特性
ET,1,SOLID185
ET,2,MESH200
KEYOPT,2,1,6
MP,EX,1,3.5E6
MP,PRXY,1,0.499
MP,ALPX,1,0.652E-4
!划分网格
TYPE,2
!划分网格
MAT,1
ESIZE,0.005
!线网格控制
LESIZE,1,,,10
LESIZE,5,,,10
LESIZE,4,,,20
LESIZE,2,0.002
LESIZE,3,0.002
LESIZE,7,0.002
LESIZE,6,0.002
LESIZE,9,0.002
!自由分网设置
MSHKEY,0
MSHAPE,0,2D
AMESH,1
LSEL,S,LINE,,2,3,1
LSEL,A,LINE,,6,7,1
LSEL,A,LINE,,9
CM,INTER,LINE
ALLSEL,ALL
LESIZE,10,,,50
!扫略分网
EXTOPT,VSWE,AUTO,0
VSWEEP,1
NUMCMP,ALL
```

02 映射分网。由于映射分网对几何模型有特殊的限制，对于平面来说，该面必须由 3 条线或 4 条线组成。如果是 4 条边，面的对边必须划分为相同数目的单元，或者是划分一过渡型网格。如果是 3 条边，则线分割总数必须为偶数且每条边的分割数相同。可以看出面 1 由 8 条边组成，为了采用映射分网，首先对线进行合并或连接，在这里采用了对线的连接处理。

❶连接面 1 的边线。将线 2、3、7、6、9 连接，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor >

Meshing > Mesh > Areas > Mapped > Concatenate > Lines，在弹出的对话框中连续选择线 2、3、6、7、9，单击“OK”按钮后，可以发现在原来线的基础上重新形成了一条线 25，如图 4-74 所示。

❷设置线的网格大小。可根据自由分网的操作，依次将线 1，4 的“Esize”设置成 10，线 5 的“Esize”设置成 20（注意划分的数量必须满足映射网格的要求），这样整体将划分成 200 个网格单元。

❸映射网格划分面。在“MeshTool”对话框中选中“Mapped”，“Mesh”的对象选择“Areas，Shape”选择“Quad”，如图 4-69 所示。然后单击“Mesh”按钮，在屏幕上选择面 1，即可对面 1 进行映射网格划分，分网后的结果如图 4-75 所示。如果觉得网格质量太疏，可以调整整体网格尺寸大小，以及在内表面加密网格。

此外对面映射分网之前我们还提到了“AMAP”命令，GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > By Corners，在弹出的对话框先选择面 1，然后分别选择 4 个顶点（关键点 1、2、6、7），生成的网格如图 4-75 所示。

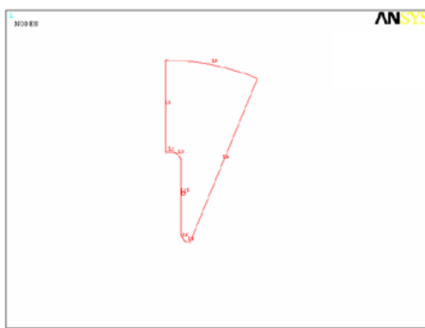


图 4-74 面上边线的连接

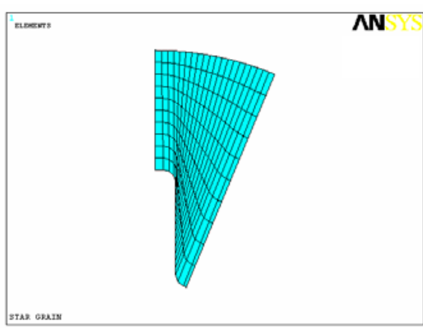


图 4-75 面的映射分网

❹扫略生成体网格。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep Opts，具体操作跟以前一样，生成的网格如图 4-76 所示。

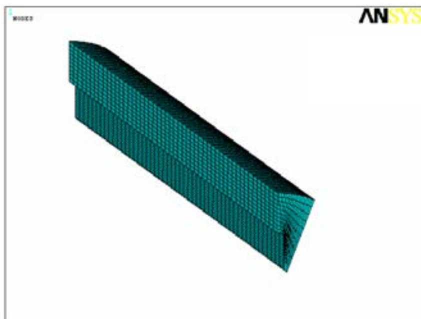


图 4-76 映射分网扫略后的结果

❺编号压缩。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers，弹出“Compress Numbers”对话框，在“Label”后面的下拉列表中选择“All”，单击“OK”按钮即可。

扫略分网（映射分网）命令流：

```
/PREP7
!定义结构分析材料特性
ET,1,SOLID185
ET,2,MESH200
KEYOPT,2,1,6
MP,EX,1,3.5E6
MP,PRXY,1,0.499
MP,ALPX,1,0.652E-4
!划分网格
TYPE,2
!划分网格
MAT,1
!内表面线组件
LSEL,S,LINE,,2,3,1
LSEL,A,LINE,,6,7,1
LSEL,A,LINE,,9
CM,INTER,LINE
ALLSEL,ALL
LCCAT,INTER
!线网格控制
LESIZE,5,,,20

LESIZE,1,,,10
LESIZE,4,,,10
!映射分网
ESIZE,0.005
MSHKEY,1
MSHAPE,0,2D
AMESH,1
LESIZE,10,,,50
!扫略分网
EXTOPT,VSWE,AUTO,0
VSWEEP,1
NUMCMP,ALL
```

采用映射分网时，如果对线进行连接或合并操作，需要注意线上的网格控制。必须满足映射分网的条件才能分网成功，否则划分网格将会失败。

4.10.3 采用延伸分网

延伸分网和扫略分网都是通过二维网格拉伸成三维网格，两者最大的区别在于：前者能在二维几何模型的基础上生成新的三维模型同时划分好网格，而后者必须是在完整的几何模型基础上来划分网格。因此采用延伸分网，必须在拉伸成三维模型之前就对二

维面（面 1）进行分网，这里我们采用了另外一种方式对面 1 分网，即将面 1 分割成各种可用于映射分网的形状。

01 生成药柱横截面（面 1）。

02 对面进行分割。为了对面 1 进行映射分网，基本原则是要使得面 1 成为 3 条边或 4 条边围成的面，可以采用对边进行连接和合并处理；另外也可以将该图形分割成许多由 3 条边或 4 条边围成的面。

通过对面 1 观察发现，药柱的内表面由 5 条边：线 2、3、6、7、9 组成。于是分别将其作为一边分割整个面，设置相应的线网格控制，最后划分的面和生成的网格分别如图 4-77 和图 4-78 所示。

03 对面进行延伸分网。由于横截面已经生成了二维网格，所以在对面作拉伸操作（GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Operate > Extrude > Along Lines）时，生成的三维几何模型将同时生成三维网格（如图 4-79 所示）。

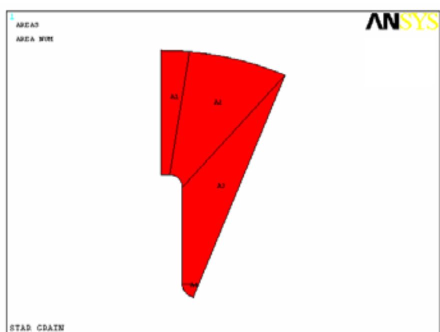


图 4-77 横截面的分割

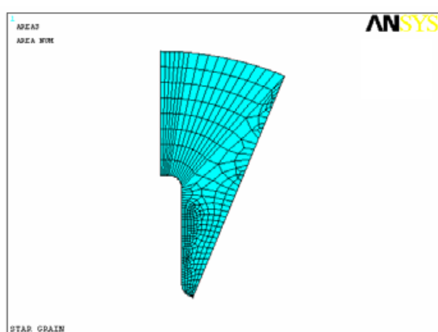


图 4-78 横截面的映射分网

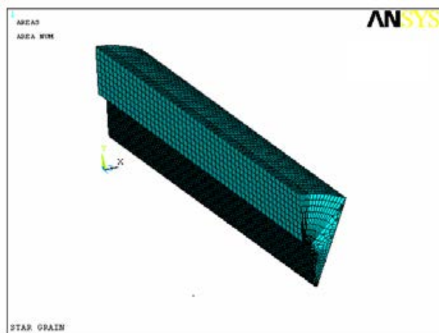


图 4-79 映射分网延伸后的结果

04 编号压缩。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers，弹出“Compress Numbers”对话框，在“Label”后面的下拉列表中选择“All”，单击“OK”按钮即可。

```
延伸分网命令流：
/CLEAR
/FILENAME,GRAIN,1
/TITLE,STAR GRAIN
```

```
/PREP7
!定义变量名称
!以下定义药柱模型尺寸
R3=0.193
!绝热层内半径（药柱外半径）
HCAO=0.119
!柱段内孔直径
WCAO=0.0125
!翼槽宽度
R4=0.050
!翼槽高度
RCAO_TOP=0.0075
!翼尖倒圆
RCAO_ROOT=0.0075
!翼根倒圆
!建立药柱横截面模型
K,1,0,R3,
K,2,0,HCAO
K,3,0,R4
K,4,WCAO,HCAO
K,5,WCAO,0
CSYS,1
K,6,R3,67.5
K,7,R4,67.5
K,8,R3,85
CSYS,0
L,1,2
L,2,4
L,4,5
L,6,7
CSYS,1
L,1,8
L,8,6
L,3,7
CSYS,0
/PNUM,LINE,1
LOVLAP,3,7
LDELE,8
LDELE,10
LFILLT,2,9,RCAO_TOP
LFILLT,9,11,RCAO_ROOT
L,10,8
L,11,6
*GET,KP_X,KP,12,loc,x
```

```
*GET,KP_Y,KP,12,loc,x
K,,KP_X+1,KP_Y
L,12,14
LOVLAP,4,12
LDELE,16
!定义结构分析材料特性
ET,1,SOLID185
ET,2,MESH200
KEYOPT,2,1,6
MP,EX,1,3.5E6
MP,PRXY,1,0.499
!划分网格
TYPE,2
!划分网格
MAT,1
ESIZE,0.005
!线分网控制
LESIZE,1,,,8
LESIZE,8,,,8
LESIZE,10,,,8
LESIZE,15,,,6
LESIZE,11,,,4
LESIZE,7,,,6
LESIZE,14,,,6

LESIZE,2,,,6
LESIZE,5,,,6
LESIZE,6,,,10
LESIZE,3,,,10

LESIZE,9,,,40
LESIZE,13,,,40
AL,1,2,5,8
AL,3,8,6,10
AL,9,10,13,15
AL,7,11,14,15
!映射分网设置
MSHKEY,0
MSHAPE,0,2D
AMESH,1,4
!面网格划分完毕
K,,0,0,0
K,,0,0,1
L,16,17
```

```
LESIZE,4,,,50
!延伸成三维网格
VDRAG,1,2,3,4,,,4
NUMCMP,ALL
```

为了映射分网的需要，有时候需要将模型分割成许多规则的小块，从而可以得到更好的网格质量，不过同时在建模的时候需要耗费大量的精力，因此应该权衡考虑得失。

第 5 章

施加载荷

建立完有限元分析模型之后，就需要在模型上施加载荷以此来检查结构或构件对一定载荷条件的响应。

本章将讲述 ANSYS 施加载荷的各种方法和应注意的相关事项。

学 习 要 点

 施加载荷

 设定载荷步选项

5.1 载荷概论

有限元分析的主要目的是检查结构或构件对一定载荷条件的响应。因此，在分析中指定合适的载荷条件是关键的一步。在 ANSYS 程序中，可以用各种方式对模型施加载荷，而且借助于载荷步选项，可以控制在求解中载荷如何使用。

5.1.1 什么是载荷

在 ANSYS 术语中，载荷包括边界条件和外部或内部作用力函数，如图 5-1 所示。不同学科中的载荷实例为：

- 结构分析：位移、力、压力、温度（热应力）和重力。
- 热力分析：温度、热流速率、对流、内部热生成、无限表面。
- 磁场分析：磁势、磁通量、磁场段、源流密度、无限表面。
- 电场分析：电势（电压）、电流、电荷、电荷密度、无限表面。
- 流体分析：速度、压力。

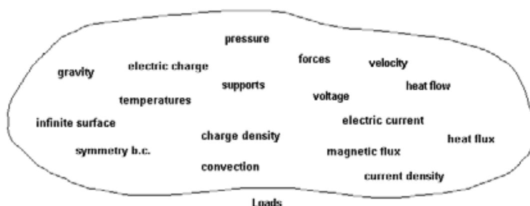


图 5-1 “载荷”包括边界条件以及其他类型的载荷

载荷分为 6 类：

- DOF（约束自由度）：某些自由度为给定的已知值。例如，结构分析中指定结点位移或者对称边界条件等；热分析中指定结点温度等。
- 力（集中载荷）：施加于模型结点上的集中载荷。例如，结构分析中的力和力矩；热分析中的热流率；磁场分析中的电流。
- 表面载荷：施加于某个表面上的分布载荷。例如，结构分析中的压力；热力分析中的对流量和热通量。
- 体积载荷：施加在体积上的载荷或者场载荷。例如，结构分析中的温度，热力分析中的内部热源密度；磁场分析中为磁场通量。
- 惯性载荷：由物体惯性引起的载荷，如重力加速度引起的重力，角速度引起的离心力等。主要在结构分析中使用。
- 耦合场载荷：可以认为是以上载荷的一种特殊情况，从一种分析中得到的结果用作为另一种分析的载荷。例如，可施加磁场分析中计算所得的磁力作为结构分析中的载荷，也可以将热分析中的温度结果作为结构分析的载荷。

5.1.2 载荷步、子步和平衡迭代

载荷步仅仅是为了获得解答的载荷配置。在线性静态或稳态分析中，可以使用不同的载荷步施加不同的载荷组合：在第一个载荷步中施加风载荷，在第二个载荷步中施加重力载荷，在第三个载荷步中施加风和重力载荷以及一个不同的支承条件等。在瞬态分析中，多个载荷步加到载荷历程曲线的不同区段。

ANSYS 程序将为第一个载荷步选择的单元组用于随后的载荷步，而不论用户为随后的载荷步指定哪个单元组。要选择一个单元组，可使用下列两种方法之一。

GUI：Utility Menu > Select > Entities。

命令：ESEL。

图 5-2 显示了一个需要 3 个载荷步的载荷历程曲线：第一个载荷步用于线性载荷，第二个载荷步用于不变载荷部分，第三个载荷步用于卸载。

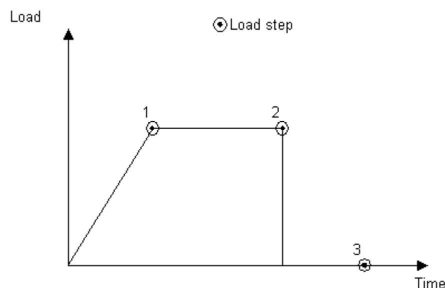


图 5-2 使用多个载荷步表示瞬态载荷历程

子步为执行求解载荷步中的点。由于不同的原因，要使用子步。

- 在非线性静态或稳态分析中，使用子步逐渐施加载荷以便能获得精确解。
- 在线性或非线性瞬态分析中，使用子步满足瞬态时间累积法则（为获得精确解通常规定一个最小累积时间步长）。
- 在谐波分析中，使用子步获得谐波频率范围内多个频率处的解。

平衡迭代是在给定子步下为了收敛而计算的附加解。仅用于收敛起着很重要的作用的非线性分析中的迭代修正。例如，对二维非线性静态磁场分析，为获得精确解，通常使用两个载荷步（如图 5-3 所示）。

- 第一个载荷步，将载荷逐渐加到 5～10 个子步以上，每个子步仅用一个平衡迭代。
- 第二个载荷步，得到最终收敛解，且仅有一个使用 15～25 次平衡迭代的子步。

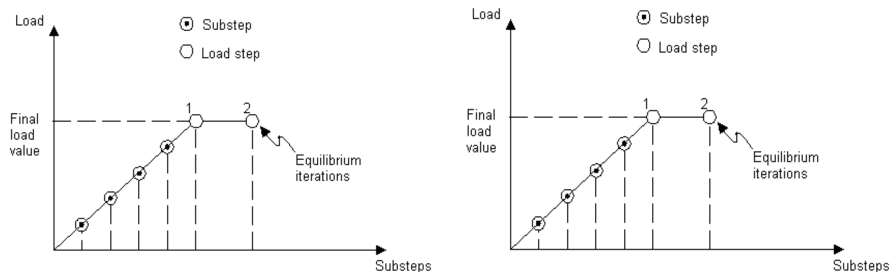


图 5-3 载荷步，子步和平衡迭代

5.1.3 时间参数

在所有静态和瞬态分析中，ANSYS 使用时间作为跟踪参数，而不论分析是否依赖于时间。其好处是：在所有情况下可以使用一个不变的“计数器”或“跟踪器”，不需要依赖于分析的术语。此外，时间总是单调增加的，且自然界中大多数事情的发生都经历一段时间，而不论该时间多么短暂。

显然，在瞬态分析或与速率有关的静态分析（蠕变或者粘塑性）中，时间代表实际的，按年月顺序的时间，用秒、分钟或小时表示。在指定载荷历程曲线的同时（使用 TIME 命令），在每个载荷步的结束点赋予时间值。使用如下方法之一赋予时间值：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Load >Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time-Time Step。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time-Time Step。

命令：TIME。

然而，在不依赖于速率的分析中，时间仅仅成为一个识别载荷步和子步的计数器。默认情况下，程序自动地对 time 赋值，在载荷步 1 结束时，赋 time＝1；在载荷步 2 结束时，赋 time＝2；依次类推。载荷步中的任何子步将被赋给合适的、用线性插值得到的时间值。在这样的分析中，通过赋给自定义的时间值，就可建立自己的跟踪参数。例如，若要将 1000 个单位的载荷增加到一载荷步上，可以在该载荷步的结束时将时间指定为1000，以使载荷和时间值完全同步。

那么，在后处理器中，如果得到一个变形-时间关系图，其含义与变形-载荷关系相同。这种技术非常有用，例如，在大变形分析以及屈曲分析中，其任务是跟踪结构载荷增加时结构的变形。

当求解中使用弧长方法时，时间还表示另一含义。在这种情况下，时间等于载荷步开始时的时间值加上弧长载荷系数（当前所施加载荷的放大系数）的数值。“ALLF”不必单调增加（即：它可以增加、减少或甚至为负），且在每个载荷步的开始时被重新设置为 0。因此，在弧长求解中，时间不作为“计数器”。

载荷步为作用在给定时间间隔内的一系列载荷。子步为载荷步中的时间点，在这些时间点，求得中间解。两个连续的子步之间的时间差称为时间步长或时间增量。平衡迭代是为了收敛而在给定时间点进行计算的迭代求解。

5.1.4 阶跃载荷与坡道载荷

当在一个载荷步中指定一个以上的子步时，就出现了载荷应为阶跃载荷或是线性载

荷的问题。

- 如果载荷是阶跃的，那么，全部载荷施加于第一个载荷子步，且在载荷步的其余部分，载荷保持不变，如图 5-4 左图所示。
- 如果载荷是逐渐递增的，那么，在每个载荷子步，载荷值逐渐增加，且全部载荷出现在载荷步结束时，如图 5-4 右图所示。

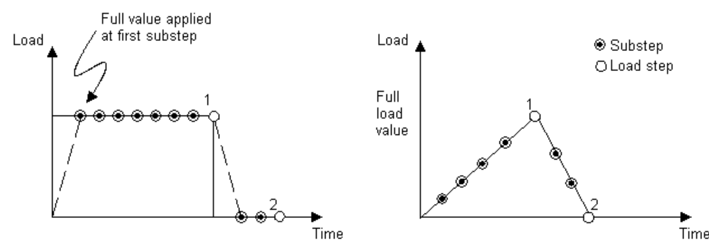


图 5-4 阶跃载荷与坡道载荷

可以通过如下方法表示载荷为坡道载荷还是阶跃载荷：

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq & Substeps。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts >Time/Frequenc>Time and Substps。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

命令：KBC。

KBC，0 表示载荷为坡道载荷；KBC，1 表示载荷为阶跃载荷。默认值取决于学科和分析类型以及“SOLCONTROL”处于“ON”或“OFF”状态。

载荷步选项是用于表示控制载荷应用的各选项（如时间，子步数，时间步，载荷为阶跃或逐渐递增）的总称。其他类型的载荷步选项包括收敛公差（用于非线性分析），结构分析中的阻尼规范以及输出控制。

5.2 施加载荷

可以将大多数载荷施加于实体模型（如关键点、线和面）上或有限元模型（节点和单元）上。例如，可在关键点或节点施加指定集中力。同样地，可以在线和面或在节点和单元面上指定对流（和其他表面载荷）。无论怎样指定载荷，求解器期望所有载荷应依据有限元模型。因此，如果将载荷施加于实体模型，在开始求解时，程序自动将这些载荷转换到节点和单元上。

5.2.1 实体模型载荷与有限单元载荷

施加于实体模型上的载荷称为实体模型载荷，而直接施加于有限元模型上的载荷称为有限单元载荷。实体模型载荷有如下优缺点：

1. 优点

- 实体模型载荷独立于有限元网格。即：可以改变单元网格而不影响施加的载荷。这就允许更改网格并进行网格敏感性研究而不必每次重新施加载荷。
- 与有限元模型相比，实体模型通常包括较少的实体。因此，选择实体模型的实体并在这些实体上施加载荷要容易得多，尤其是通过图形拾取时。

2. 缺点

- ANSYS 网格划分命令生成的单元处于当前激活的单元坐标系中。网格划分命令生成的节点使用整体笛卡尔坐标系。因此，实体模型和有限元模型可能具有不同的坐标系和加载方向。
- 在简化分析中，实体模型不很方便。此时，载荷施加于主自由度（仅能在节点而不能在关键点定义主自由度）。
- 施加关键点约束很棘手，尤其是当约束扩展选项被使用时（扩展选项允许将一约束特性扩展到通过一条直线连接的两关键点之间的所有节点上）。
- 不能显示所有实体模型载荷。

如前所述，在开始求解时，实体模型载荷将自动转换到有限元模型。ANSYS 程序改写任何已存在于对应的有限单元实体上的载荷。删除实体模型载荷将删除所有对应的有限元载荷。有限单元载荷有如下优缺点：

1. 优点

- 在简化分析中不会产生问题，因为可将载荷直接施加在主节点。
- 不必担心约束扩展，可简单地选择所有所需节点，并指定适当的约束。

2. 缺点

- 任何有限元网格的修改都使载荷无效，需要删除先前的载荷并在新网格上重新施加载荷。
- 不便使用图形拾取施加载荷。除非仅包含几个节点或单元。

5.2.2 施加载荷

本节主要讨论如何施加 DOF 约束、集中力、表面载荷、体积载荷、惯性载荷和耦合场载荷。

1．DOF 约束

表 5-1 显示了每个学科中可被约束的自由度和相应的 ANSYS 标识符。标识符（如 UX、ROTZ、AY 等）所包含的任何方向都在节点坐标系中。

表 5-2 显示了施加、列表显示和删除 DOF 约束的命令。需要注意的是，可以将约束施加于节点、关键点、线和面上。

下面是一些可用于施加 DOF 约束的 GUI 路径的例子：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Nodes。

GUI：Utility Menu > List > Loads > DOF Constraints > On All Keypoints。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > load type > On Lines。

表 5-1 每个学科中可用的 DOF 约束

学科	自由度	ANSYS 标识符
结构分析	平移 旋转	UX、UY、UZ ROTX、ROTY、ROTZ
热力分析	温度	TEMP
磁场分析	矢量势 标量势	AX、AY、AZ MAG
电场分析	电压	VOLT
流体分析	速度 压力 紊流动能 紊流扩散速率	VX、VY、VZ PRES ENKE ENDS

表 5-2 DOF 约束的命令

位置	基本命令	附加命令
节点	D，DLIST，DDELE	DSYM，DSCALE，DCUM
关键点	DK，DKLIST，DKDELE	
线	DL，DLLIST，DLDELE	
面	DA，DALIST，DADELE	
转换	SBCTRAN	DTRAN

2．集中力

表 5-3 显示了每个学科中可用的集中载荷和相应的 ANSYS 标识符。标识符（如 FX、MZ、CSGY 等）所包含的任何方向都在节点坐标系中。

表 5-3 每个学科中的集中力

学科	力	ANSYS 标识符
结构分析	力 力矩	FX、FY、FZ MX、MY、MZ
热力分析	热流速率	HEAT
磁场分析	Current Segments 磁通量	CSGX、CSGY、CSGZ FLUX
电场分析	电流 电荷	AMPS CHRG
流体分析	流体流动速率	FLOW

表 5-4 显示了施加、列表显示和删除集中载荷的命令。需要注意的是，可以将集中载荷施加于节点和关键点上。

下面是一些用于施加集中力载荷的 GUI 路径的例子：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Nodes。

GUI：Utility Menu > List > Loads > Forces > On Keypoints。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > load type > On Lines。

表 5-4 用于施加集中力载荷的命令

位置	基本命令	附加命令
节点	F，FLIST，FDELE	FSCALE，FCUM
关键点	FK，FKLIST，FKDELE	
转换	SBCTRAN	FTRAN

3．面载荷

表 5-5 显示了每个学科中可用的表面载荷和相应的 ANSYS 标识符。

表 5-5 每个学科中可用的表面载荷

学科	表面载荷	ANSYS 标识符
结构分析	压力	PRES
热力分析	对流 热流量 无限表面	CONV HFLUX INF
磁场分析	麦克斯韦表面 无限表面	MXWF INF
电场分析	麦克斯韦表面 表面电荷密度 无限表面	A MXWF CHRGS INF
流体分析	流体结构界面 阻抗	FSI IMPD
所有学科	超级单元载荷矢	SELV

表 5-6 显示了施加、列表显示和删除表面载荷的命令。需要注意的是，不仅可以将表面载荷施加在线和面上，还可以施加于节点和单元上。

表 5-6 用于施加表面载荷的命令

位置	基本命令	附加命令
节点	SF，SFLIST，SFDELE	SFSCALE，SFCUM，SFFUN
单元	SFE，SFELIST，SFEDELE	SEBEAM，SFFUN，SFGRAD
线	SFL，SFLLIST，SFLDELE	SFGRAD
面	SFA，SFALIST，SFADELE	SFGRAD
转换	SFTRAN	

下面是一些用于施加表面载荷的 GUI 路径的例子：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Nodes。

GUI：Utility Menu > List > Loads > Surface Loads > On Elements。

GUI：Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Lines。

ANSYS 程序根据单元和单元面存储在节点上指定的面载荷。因此，如果对同一表面使用节点面载荷命令和单元面载荷命令，则使用最后的规定。

4．体积载荷

表 5-7 显示了每个学科中可用的体积载荷和相应的 ANSYS 标识符。

表 5-7 每个学科中可用的体积载荷

学科	体积载荷	ANSYS 标识符
结构分析	温度 热流量	TEMP FLUE
热力分析	热生成速率	HGEN
磁场分析	温度 磁场密度 虚位移 电压降	TEMP JS MVDI VLTG
电场分析	温度 体积电荷密度	TEMP CHRGD
流体分析	热生成速率 力速率	HGEN FORC

表 5-8 显示了施加、列表显示和删除表面载荷的命令。需要注意的是，可以将体积载荷施加在节点，单元，关键点，线，面和体上。

表 5-8 用于施加体积载荷的命令

位置	基本命令	附加命令
节点	BF，BFLIST，BFDELE	BFSCALE，BFCUM，BFUNIF
单元	BFE，BFELIST，BFEDELE	BEESCAL，BFECUM
关键点	BFK，BFKLIST，BFKDELE	
线	BFL，BFLLIST，BFLDELE	
面	BFA，BFALIST，BFADELE	
体	BFV，BFVLIST，BFVDELE	
转换	BFTRAN	

下面是一些用于施加体积载荷的 GUI 路径的例子：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Nodes。

GUI：Utility Menu > List > Loads > Body Loads > On Picked Elems。

GUI：Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > load type > On Keypoints。

GUI：Utility Menu > List > Load > Body Loads > On Picked Lines。

GUI：Main Menu > Solution > Load > Apply > load type > On Volumes。

在节点指定的体积载荷独立于单元上的载荷。对于一个给定的单元，ANSYS 程序按下列方法决定使用哪一载荷。

（1）ANSYS 程序检查是否对单元指定体积载荷。

（2）如果不是，则使用指定给节点的体积载荷。

（3）如果单元或节点上没有体积载荷，则通过 BFUNIF 命令指定的体积载荷生效。

5．惯性载荷

施加惯性载荷的命令如表 5-9 所示。

表 5-9 惯性载荷命令

命令	GUI 菜单路径
ACEL	Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Flow Environment > Gravity Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Gravity Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Gravity
CGLOC	Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Flow Environment > Rotating Coords Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Define Loads>Apply>Structural>Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Coriolis Effects MainMenu > Preprocessor > LS-DYNAOptions > LoadingOptions > AccelerationCS > Delete Accel CS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > AccelerationCS > Set Accel CS Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Solution > Loading Options > Acceleration CS > Delete Accel CS Main Menu > Solution > Loading Options > Acceleration CS > Set Accel CS
CGOMGA	Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Flow Environment > Rotating Coords Main Menu > Preprocessor>Loads>Define Loads>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Coriolis Effects Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Coriolis Effects
DCGOMG	Main Menu>Preprocessor >Loads >Define Loads>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Coriolis Effects Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Coriolis Effects Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Coriolis Effects
DOMEGA	MainMenu > Preprocessor > Loads > DefineLoads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > AngularAccel > Global MainMenu > Preprocessor > Loads > DefineLoads > Delete > Structural > Inertia > AngularAccel > Global Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Angular Accel > Global Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Angular Accel > Global
IRLF	Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Inertia Relief Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Output Ctrls > Incl Mass Summry Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Inertia Relief Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Incl Mass Summry
OMEGA	MainMenu > Preprocessor > Loads > DefineLoads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > AngularVelocity > Global MainMenu > Preprocessor > Loads > DefineLoads > Delete > Structural > Inertia > AngularVeloc > Global Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Angular Velocity > Global Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Inertia > Angular Veloc > Global

没有用于列表显示或删除惯性载荷的专门命令。要列表显示惯性载荷，执行 STAT，INRTIA（Utility Menu > List > Status > Soluion > Inerti Loads）。要去除惯性载荷，只要将载荷值设置为 0。可以将惯性载荷设置为 0，但是不能删除惯性载荷。对逐步上升的载荷步，惯性载荷的斜率为 0。

ACEL，OMEGA 和 DOMEGA 命令分别用于指定在整体笛卡尔坐标系中的加速度，角速度和角加速度。

ACEL 命令用于对物体施加一加速场（非重力场）。因此，要施加作用于负 Y 方向的重力，应指定一个和正 Y 方向的加速度。

使用“CGOMGA”和“DCGOMG”命令指定一旋转物体的角速度和角加速度，该物体本身正相对于另一个参考坐标系旋转。“CGLOC”命令用于指定参照系相对于整体笛卡尔坐标系的位置。例如：在静态分析中，为了考虑“Coriolis”效果，可以使用这些

命令。

惯性载荷当模型具有质量时有效。惯性载荷通常是通过指定密度来施加的（还可以通过使用质量单元，如“MASS21”，对模型施加质量，但通过密度的方法施加惯性载荷更常用、更有效）。对所有的其他数据，ANSYS程序要求质量为恒定单位。如果习惯于英制单位，为了方便起见，有时希望使用重量密度（lb/in^3）来代替质量密度（$lb\text{-}sec^2/in/in^3$）。

只有在下列情况下可以使用重量密度来代替质量密度：

（1）模型仅用于静态分析。

（2）没有施加角速度或角加速度。

（3）重力加速度为单位值（g＝1.0）。

为了能够以“方便的”重力密度形式或以“一致的”质量密度形式使用密度，指定密度的一种简便的方法是将重力加速度 g 定义为参数，如表 5-10 所示。

表 5-10 指定密度的方式

方便形式	一致形式	说明
g＝1.0	g＝386.0	参数定义
MP，DENS，1，0.283/g	MP，DENS，1，0.283/g	钢的密度
ACEL，，g	ACEL，，g	重力载荷

6．耦合场载荷

在耦合场分析中，通常包含将一个分析中的结果数据施加于第二个分析作为第二个分析的载荷。例如，可以将热力分析中计算的节点温度施加于结构分析（热应力分析）中，作为体积载荷。同样的，可以将磁场分析中计算的磁力施加于结构分析中，作为节点力。要施加这样的耦合场载荷，用下列方法之一:

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Define Loads > Apply > load type > From source。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > load type > From source。

命令：LDREAD。

5.2.3 利用表格来施加载荷

通过一定的命令和菜单路径，能够利用表格参数来施加载荷，即：通过指定列表参数名来代替指定特殊载荷的实际值。然而，并不是所有的边界条件都支持这种制表载荷，因此，在使用表格来施加载荷时一般先参考一定的文件来确定指定的载荷是否支持表格参数。

当经由命令来定义载荷时，必须使用符号%：%表格名%。例如：当确定一描述对流值表格时，有如下命令表达式：

```
SF, all, conv, %sycnv%, tbulk
```

在施加载荷的同时，可以定义新的表格通过选择“new table”选项。同样的，在施加载荷之前还可以通过如下方式之一来定义一表格：

GUI：Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit。

命令：*DIM。

1．定义初始变量

当定义一个列表参数表格时，根据不同的分析类型，可以定义各种各样的初始参数。表 5-11 显示了不同分析类型的边界条件、初始变量及对应的命令。

表 5-11 边界条件类型及其相应的初始变量

边界条件	初始变量	命令
热分析		
固定温度	TIME, X, Y, Z	D,,(TEMP, TBOT, TE2, TE3, . . ., TTOP)
热流	TIME, X, Y, Z, TEMP	F,,(HEAT, HBOT, HE2, HE3, . . ., HTOP)
对流	TIME, X, Y, Z, TEMP, VELOCITY	SF,,CONV
体积温度	TIME, X, Y, Z	SF,,,TBULK
热通量	TIME, X, Y, Z, TEMP	SF,,HFLU
热源	TIME, X, Y, Z, TEMP	BFE,,HGEN
结构分析		
位移	TIME, X, Y, Z, TEMP	D,(UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)
力和力矩	TIME, X, Y, Z, TEMP, SECTOR	F,(FX, FY, FZ, MX, MY, MZ)
压力	TIME, X, Y, Z, TEMP, SECTOR	SF,,PRES
温度	TIME	BF,,TEMP
电场分析		
电压	TIME, X, Y, Z	D,,VOLT
电流	TIME, X, Y, Z	F,,AMPS
流体分析		
压力	TIME, X, Y, Z	D,,PRES
流速	TIME, X, Y, Z	F,,FLOW

单元 SURF151、SURF152 和单元 FLUID116 的实常数与初始变量相关联，如表 5-12 所示。

2．定义独立变量

当需要指定不同于列表显示的初始变量时，可以定义一个独立的参数变量。当指定独立参数变量同时，定义了一个附加表格来表示独立参数。这一表格必须与独立参数变量同名，并且同时是一个初始变量或者另外一个独立参数变量的函数。能够定义许多必须的独立参数，但是所有的独立参数必须与初始变量有一定的关系。

表 5-12 实常数与相应的初始变量

实常数	初始变量
SURF151、SURF152	
旋转速率	TIME，X，Y，Z
FLUID116	
旋转速率	TIME，X，Y，Z
滑动因子	TIME，X，Y，Z

例如：考虑一对流系数（HF），其变化为旋转速率（RPM）和温度（TEMP）的函数。此时，初始变量为 TEMP，独立参数变量为 RPM，而 RPM 是随着时间的变化而变化。因此，需要两个表格：一个关联 RPM 与 TIME，另一个关联 HF 与 RPM 和 TEMP，其命令流如下：

```
*DIM,SYCNV,TABLE,3,3,,RPM,TEMP
SYCNV(1,0)=0.0,20.0,40.0
SYCNV(0,1)=0.0,10.0,20.0,40.0
SYCNV(0,2)=0.5,15.0,30.0,60.0
SYCNV(0,3)=1.0,20.0,40.0,80.0
*DIM,RPM,TABLE,4,1,1,TIME
RPM(1,0)=0.0,10.0,40.0,60.0
RPM(1,1)=0.0,5.0,20.0,30.0
SF,ALL,CONV,%SYCNV%
```

3．表格参数操作

可以通过如下方式对表格进行一定的数学运算，如加法、减法与乘法。

GUI：Utility Menu > Parameters > Array Operations > Table Operations。

命令：*TOPER

两个参与运算的表格必须具有相同的尺寸，每行、每列的变量名必须相同等。

4．确定边界条件

当利用列表参数来定义边界条件时，可以通过如下 5 种方式检验其是否正确。

（1）检查输出窗口。当使用制表边界条件于有限单元或实体模型时，于输出窗口显示的是表格名称而不是一定的数值。

（2）列表显示边界条件。当在前处理过程中列表显示边界条件时，列表显示表格名称；而当在求解或后处理过程中列表显示边界条件时，显示的却是位置或时间。

（3）检查图形显示。在制表边界条件运用的地方，可以通过标准的 ANSYS 图形显示功能（/PBC，/PSF 等）显示出表格名称和一些符号（箭头），当然前提是表格编号显示处于工作状态（/PNUM，TABNAM，ON）。

（4）在通用后处理中检查表格的代替数值。

（5）通过命令“*STATUS”或者 GUI 菜单路径（Utility Menu > List > Other > Parameters）可以重新获得任意变量结合的表格参数值。

5.2.4 轴对称载荷与反作用力

对约束，表面载荷，体积载荷和 Y 方向加速度，可以像对任何非轴对称模型上定义这些载荷一样来精确地定义这些载荷。然而，对集中载荷的定义，过程有所不同。因为这些载荷大小、输入的力、力矩等数值是在 360°范围内进行的，即：根据沿周边的总载荷输入载荷值。例如，如果 1500lb/in 沿周的轴对称轴向载荷被施加到直径为 10in 的管上（如图 5-5 所示），47，124lb（1500×2π×5＝47124）的总载荷将按下列方法被施加到节点 N 上：

```
F，N，FY，47124
```

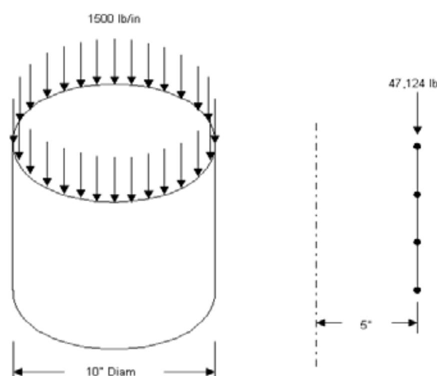


图 5-5 在 360°范围内定义集中轴对称载荷

轴对称结果也按对应的输入载荷相同的方式解释，即：输出的反作用力，力矩等按总载荷（360°）计。轴对称协调单元要求其载荷表示成傅立叶级数形式来施加。对这些单元，要求用“MODE”命令（Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > For Harmonic Ele 或 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > For Harmonic Ele），以及其他载荷命令（D，F，SF 等）。一定要指定足够数量的约束防止产生不期望的刚体运动、不连续或奇异性。例如，对实心杆这样的实体结构的轴对称模型，缺少沿对称轴的 UX 约束，在结构分析中就可能形成虚位移（不真实的位移），如图 5-6 所示。

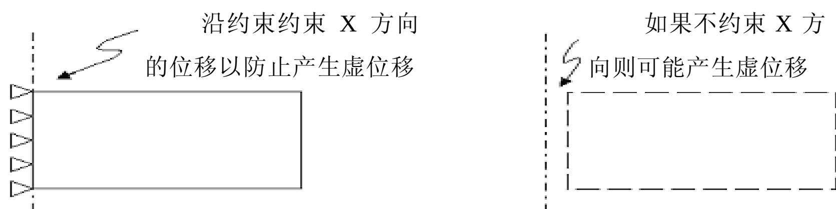


图 5-6 实体轴对称结构的中心约束

5.2.5 利用函数来施加载荷和边界条件

可以通过一些函数工具对模型施加复杂的边界条件。函数工具包括两个部分：

（1）函数编辑器：创建任意的方程或者多重函数。

（2）函数装载器：获取创建的函数并制成表格。可以分别通过两种方式进入函数编辑器和函数装载器：

GUI：Utility Menu > Parameters > Functions > Define/Edit，或者 GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Functions > Define/Edit。

GUI：Utility Menu > Parameters > Functions > Read from file，或者 GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Functions > Read file。

当然，在使用函数边界条件之前，应该了解以下一些要点：

- 当数据能够方便地用一表格表示时，我们推荐使用表格边界条件。
- 在表格中，函数呈现等式的形式而不是一系列的离散数值。
- 不能够通过函数边界条件来避免一些限制性边界条件，并且这些函数对应的初始变量是被表格边界条件支持的。

同样的，当使用函数工具时，还必须熟悉如下几个特定的情况：

- 函数：一系列方程定义了高级边界条件。
- 初始变量：在求解过程中被使用和评估的独立变量。
- 域：以单一的域变量为特征的操作范围或设计空间的一部分。域变量在整个域中是连续的，每个域包含一个唯一的方程来评估函数。
- 域变量：支配方程用于函数的评估而定义的变量。
- 方程变量：在方程中指定的一个变量，此变量在函数装载过程中被赋值。

1．函数编辑器的使用

函数编辑器定义了域和方程。通过一系列的初始变量，方程变量和数学函数来建立方程。能够创建一个单一的等式，也可以创建包含一系列方程等式的函数，而这些方程等式对应于不同的域。

使用函数编辑器的步骤如下：

（1）打开函数编辑器：GUI：Utiltity Menu > Parameters > Functions > Define/Edit 或者 Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Functions > Define/Edit。

（2）选择函数类型。选择单一方程或者一个复合函数。如果选择后者，则必须输入域变量的名称。当选择复合函数时，6 个域标签被激活。

（3）选择“degrees ”或者“radians”。这一选择仅仅决定了方程如何被评估，对命令“*AFUN”没有任何影响。

（4）定义结果方程或者使用初始变量和方程变量来描述域变量的方程。如果定义一个单一方程的函数，则跳到第 10 步。

（5）单击第一个域标签。输入域变量的最小和最大值。

（6）在此域中定义方程。

（7）单击第二个域标签。注意，第二个域变量的最小值已被赋值了，且不能被改变，这就保证了整个域的连续性。输入域变量的最大值。

（8）在此域中定义方程。

（9）重复这一过程直到最后一个域。

（10）对函数进行注释。单击编辑器菜单栏 Editor > Comment，输入对函数的注释。

（11）保存函数。单击编辑器菜单栏 Editor > Save 并输入文件名。文件名必须以.func 为后缀名。

一旦函数被定义且保存了，可以在任何一个 ANSYS 分析使用它们。为了使用这些函数，必须装载它们并对方程变量进行赋值，同时赋予其表格参数名称为了在特定的分析中使用它们。

2．函数装载器的使用

当在分析中准备对方程变量进行赋值、对表格参数指定名称和使用函数时，需要把函数装入函数装载器中，其步骤如下：

（1）打开函数装载器：GUI：Utility Menu > Parameters > Functions > Read from file。

（2）打开保存函数的目录，选择正确的文件并打开。

（3）在函数装载对话框中，输入表格参数名。

（4）在对话框的底部，将看到一个函数标签和构成函数的所有域标签及每个指定方程变量的数据输入区，输入合适的数值。

在函数装载对话框中，仅数值数据可以作为常数值，而字符数据和表达式不能被作为常数值。

（5）重复每个域的过程。

（6）单击保存。直到已经为函数中每个域中的所有变量赋值后，才能以表格参数的形式来保存。

函数作为一个代码方程被制成表格，在 ANSYS 中，当表格被评估时，这种代码方程才起作用。

3．图形或列表显示边界条件函数

可以图形显示定义的函数，可视化当前的边界条件函数，还可以列表显示方程的结果。通过这种方式，可以检验定义的方程是否和所期待的一样。无论图形显示还是列表显示，都需要先选择一个要图形显示其结果的变量，并且必须设置其 X 轴的范围和图形显示点的数量。

5.3 设定载荷步选项

载荷步选项（Load step options）是各选项的总称，这些选项用于在求解选项中及其他选项（如输出控制、阻尼特性和响应频谱数据）中控制如何使用载荷。载荷步选项随

载荷步的不同而异。有 6 种类型的载荷步选项：

- 通用选项。
- 动态选项。
- 非线性选项。
- 输出控制。
- Biot-Savart 选项。
- 谱选项。

5.3.1 通用选项

通用选项包括：瞬态或静态分析中载荷步结束的时间，子步数或时间步大小，载荷阶跃或递增，以及热应力计算的参考温度。以下是对每个选项的简要说明。

1．时间选项

“TIME”命令用于指定在瞬态或静态分析中载荷步结束的时间。在瞬态或其他与速率有关的分析中，“TIME”命令指定实际的、按年月顺序的时间，且要求指定一时间值。在与非速率无关的分析中，时间作为一跟踪参数。

在 ANSYS 分析中，决不能将时间设置为 0。如果执行 TIME，0 或 TIME，<空 > 命令，或者根本就没有发出 TIME 命令，ANSYS 使用默认时间值；第一个载荷步为 1.0，其他载荷步为 1.0＋前一个时间。要在“0”时间开始分析，如在瞬态分析中，应指定一个非常小的值，如：TIME，1E-6。

2．子步数与时间步大小

对于非线性或瞬态分析，要指定一个载荷步中需要的子步数。指定子步的方法如下：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

命令：DELTIM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq & Substeps。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq & Substeps。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Time/Frequenc > Freq & Substeps。

命令：NSUBST。

“NSUBST”命令指定子步数，“DELTIM”命令指定时间步的大小。在默认情况下，ANSYS 程序在每个载荷步中使用一个子步。

3．时间步自动阶跃

AUTOTS 命令激活时间步自动阶跃。等价的 GUI 路径为：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time & Time Step。

在时间步自动阶跃时，根据结构或构件对施加载荷的响应，程序计算每个子步结束时最优的时间步。在非线性静态或稳态分析中使用时，AUTOTS 命令确定了子步之间载荷增量的大小。

4．阶跃或递增载荷

在一个载荷步中指定多个子步时，需要指明载荷是逐渐递增还是阶跃形式。KBC 命令用于此目的：“KBC，0”指明载荷是逐渐递增；“KBC，1”指明载荷是阶跃载荷。默认值取决于分析的学科和分析类型（与 KBC 命令等价的 GUI 路径和与 DELTIM 和 NSUBST 命令等价的 GUI 路径相同）。

关于阶跃载荷和逐渐递增载荷的几点说明：

（1）如果指定阶跃载荷，程序按相同的方式处理所有载荷（约束，集中载荷，表面载荷，体积载荷和惯性载荷）。根据情况，阶跃施加、阶跃改变或阶跃移去这些载荷。

（2）如果指定逐渐递增载荷，那么：

- 在第一个载荷步施加的所有载荷，除了薄膜系数外，都是逐渐递增的（根据载荷的类型，从 0 或从 BFUNIF 命令或其等价的 GUI 路径所指定的值逐渐变化，参见表 5-13）。薄膜系数是阶跃施加的。

表 5-13 不同条件下逐渐变化载荷（KBC＝0）的处理

载荷类型	施加于第一个载荷步	输入随后的载荷步
DOF（约束自由度）		
温度	从TUNIF[2]逐渐变化	从TUNIF[3]逐渐变化
其他	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化
力	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化
表面载荷		
TBULK	从TUNIF[2]逐渐变化	从 TUNIF 逐渐变化
HCOEF	跳跃变化	从 0 逐渐变化[4]
其他	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化
体积载荷		
温度	从TUNIF[2]逐渐变化	从TUNIF[3]逐渐变化
其他	从BFUNIF[3]逐渐变化	从BFUNIF[3]逐渐变化
惯性载荷[1]	从 0 逐渐变化	从 0 逐渐变化

阶跃与线性加载不适用于温度相关的薄膜系数（在对流命令中，作为 N 输入），总是以温度函数所确定的值大小施加温度相关的薄膜系数。

- 在随后的载荷步中，所有载荷的变化都是从先前的值开始逐渐变化。

在全谐波（ANTYPE，HARM 和 HROPT，FULL）分析中，表面载荷和体积载荷的逐渐变化与在第一个载荷步中的变化相同，且不是从先前的值开始逐渐变化。除了 PLANE2，SOLID45，SOLID92 和 SOLID95，是从先前的值开始逐渐变化外。

- 在随后的载荷步中新引入的所有载荷是逐渐变化的（根据载荷的类型，从 0 或从 BFUNIF 命令所指定的值递增，参见表 5-13）。
- 在随后的载荷步中被删除的所有载荷，除了体积载荷和惯性载荷外，都是阶跃移去的。体积载荷逐渐递增到“BFUNIF”，不能被删除而只能被设置为 0 的惯性载荷，则逐渐变化到 0。
- 在相同的载荷步中，不应删除或重新指定载荷。在这种情况下，逐渐变化不会按所期望的方式作用。

1）对惯性载荷，其本身为线性变化的，因此，产生的力在该载荷步上是二次变化。

2）TUNIF 命令在所有节点指定一均布温度。

3）在这种情况下，使用的“TUNIF”或“BFUNIF”值是先前载荷步的，而不是当前值。

4）总是以温度函数所确定的值的大小施加温度相关的膜层散热系数，而不论“KBC”的设置如何。

5）“BFUNIF”命令仅是“TUNIF”命令的一个同类形式，用于在所有节点指定一均布体积载荷。

5．其他通用选项

（1）热应力计算的参考温度，其默认值为 0。指定该温度的方法如下：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Reference Temp。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Settings > Reference Temp。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Reference Temp。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Reference Temp。

命令：TREF。

（2）对每个解（即：每个平衡迭代）是否需要一个新的三角矩阵。仅在静态（稳态）分析或瞬态分析中，使用下列方法之一，可用一个新的三角矩阵。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Reuse Tri Matrix。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Reuse Tri Matrix。

命令：KUSE。

默认情况下，程序根据 DOF 约束的变化，温度相关材料的特性，以及 New-Raphson 选项确定是否需要一个新的三角矩阵。如果“KUSE”设置为 1，程序再次使用先前的三角矩阵。

在重新开始过程中，该设置非常有用：对附加的载荷步，如果要重新进行分析，而

且知道所存在的三角矩阵（在文件 Jobname.TRI 中）可再次使用，通过将“KUSE”设置为 1，可节省大量的计算时机。“KUSE，-1”命令迫使在每个平衡迭代中三角矩阵再次用公式表示。在分析中很少使用它，主要用于调试中。

（3）模式数（沿周边谐波数）和谐波分量是关于全局 X 坐标轴对称还是反对称。当使用反对称协调单元（反对称单元采用非反对称加载）时，载荷被指定为一系列谐波分量（傅立叶级数）。

要指定模式数，使用下列方法之一：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > For Harmonic Ele。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > For Harmonic Ele Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > For Harmonic Ele。

命令：MODE。

（4）在 3-D 磁场分析中所使用的标量磁势公式的类型，通过下列方法之一指定：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Magnetics > potential formulation method。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Magnetics > potential formulation method。

命令：MAGOPT。

（5）在缩减分析的扩展过程中，扩展的求解类型，通过下列方法之一指定：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > Range of Solu's。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > Range of Solu's。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > By Load Step。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > By Time/Freq。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > By Load Step。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > By Time/Freq。

命令：NUMEXP，EXPSOL。

5.3.2 非线性选项

主要是用于非线性分析的选项如表 5-14 所示。

表 5-14 非线性分析选项

命令	GUI 菜单路径	用途
NEQIT	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Nonlinear > Equilibrium Iter	指定每个子步最大平衡迭代的次数（默认=25）
CNVTOL	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Nonlinear > Convergence Crit Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Convergence Crit Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Nonlinear > Convergence Crit	指定收敛公差
NCNV	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Nonlinear > Criteria to Stop Main Menu > Solution > Sol'n Control Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Criteria to Stop Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Nonlinear > Criteria to Stop	为终止分析提供选项

5.3.3 动力学分析选项

主要用于动态和其他瞬态分析的选项如表 5-15 所示。

表 5-15 动态和其他瞬态分析选项

命令	GUI 菜单路径	用途
TIMINT	MainMenu > Preprocessor > Loads > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Time Integration Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control MainMenu > Solution > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Time Integration MainMenu > Solution > UnabridgedMenu > Time/Frequenc > Time Integration	激活或取消时间积分
HARFRQ	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq & Substeps Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq & Substeps	在谐波响应分析中指定载荷的频率范围
ALPHAD	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control 。 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Time/Frequenc > Damping	指定结构动态分析的阻尼
BETAD	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control。 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Time/Frequenc > Damping	指定结构动态分析的阻尼
DMPRAT	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping Main Menu > Solution > Time/Frequenc > Damping	指定结构动态分析的阻尼
MDAMP	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping	指定结构动态分析的阻尼

5.3.4 输出控制

输出控制用于控制分析输出的数量和特性。如表 5-16 所示有两个基本输出控制。

表 5-16 输出控制命令

命令	GUI 菜单路径	用途
OUTRES	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File Main Menu > Solution > Load Step Opts > Sol'n Control。 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File	控制 ANSYS 写入数据库和结果文件的内容以及写入的频率
OUTPR	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout	控制打印（写入解输出文件 Jobname.OUT）的内容以及写入的频率

下例说明了“OUTERS”和“OUTPR”命令的使用：

```
OUTRES,ALL,5            !    写入所有数据：每到第 5 子步写入数据
OUTPR,NSOL,LAST         !   仅打印最后子步的节点解
```

可以发出一系列“OUTER”和“OUTERS”命令（达 50 个命令组合）以精确控制解地输出。但必须注意：命令发出的顺序很重要。例如，下列所示的命令把每到第 10 子步的所有数据和第 5 子步的节点解数据写入数据库和结果文件。

```
OUTRES,ALL,10
OUTRES,NSOL,5
```

然而，如果颠倒命令的顺序（如下所示），那么第二个命令优先于第一个命令，使每到第 10 子步的所有数据被写入数据库和结果文件，而每到第 5 子步的节点解数据则未被写入数据库和结果文件中。

```
OUTRES,NSOL,5
OUTRES,ALL,10
```

程序在默认情况下输出的单元解数据取决于分析类型。要限制输出的解数据，使用“OUTRES”有选择地抑制（FREQ＝NONE）解数据的输出，或首先抑制所有解数据（OUTRES，ALL，NONE）的输出，然后通过随后的“OUTRES”命令有选择地打开数据的输出。

第三个输出控制命令“ERESX”允许在后处理中观察单元积分点的值。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Output Ctrls > Integration Pt。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Integration Pt。

命令：ERESX。

默认情况下，对材料非线性（例如，非 0 塑性变形）以外的所有单元，ANSYS 程序使用外推法并根据积分点的数值计算在后处理中观察的节点结果。通过执行“ERESX，NO”命令，可以关闭外推法，相反，将积分点的值复制到节点，使这些值在后处理中可用。另一个选项“ERESX，YES”，迫使所有单元都使用外推法，而不论单元是否具有

材料非线性。

5.3.5 Biot-Savart选项

用于磁场分析的选项有两个命令，如表 5-17 所示。

表 5-17 Biot-Savart 命令

命令	GUI 菜单路径	用途
BIOT	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Magnetics > Options Only > Biot-Savart。 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Magnetics > Options Only > Biot-Savart。	计算由于所选择的源电流场引起的磁场密度
EMSYM	Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Magnetics > Options Only > Copy Sources。 Main Menu > Solution > Load Step Opts > Magnetics > Options Only > Copy Sources。	复制呈周向对称的源电流场

5.3.6 谱分析选项

这类选项中有许多命令，所有命令都用于指定响应谱数据和功率谱密度（PSD）数据。在频谱分析中，使用这些命令，参见帮助文件中的“ANSYS Structural Analysis Guide”说明。

5.3.7 创建多载荷步文件

所有载荷和载荷步选项一起构成了一个载荷步，程序用其计算该载荷步的解。如果有多个载荷步，可将每个载荷步存入一个文件，调入该载荷步文件，并从文件中读取数据求解。

“LSWRITE”命令写载荷步文件（每个载荷步一个文件，以 Jobname.S01，Jobname.S02，Jobname.S03，等识别）。使用以下方法之一：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Write LS File。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File。

命令：LSWRITE。

所有载荷步文件写入后，可以使用命令在文件中顺序读取数据，并求得每个载荷步的解。下例所示的命令组定义多个载荷步：

```
/SOLU                              ！输入 Solution
0
！载荷步 1：
D, ...                             ！载荷
SF，...
```

```
...
NSUBST，...                             ！载荷步选项
KBC，...
OUTRES，...
OUTPR，...
...
LSWRITE                                 ！写入载荷步文件：Jobname.S01
！
！载荷步 2：
D, ...                                  ！载荷
SF，...
...
NSUBST，...                             ！载荷步选项
KBC，...
OUTRES，...
OUTPR，...
...
LSWRITE                                 ！写入载荷步文件：Jobname.S02
...
```

关于载荷步文件的几点说明：

（1）载荷步数据根据 ANSYS 命令被写入文件。

（2）LSWRITE 命令不捕捉实常数（R）或材料特性（MP）的变化。

（3）LSWRITE 命令自动地将实体模型载荷转换到有限元模型，因此所有载荷按有限元载荷命令的形式被写入文件。特别地，表面载荷总是按 SFE（或 SFBEAM）命令的形式被写入文件，而不论载荷是如何施加的。

（4）要修改载荷步文件序号为 N 的数据，执行命令“LSREAD，n”在文件中读取数据，作所需的改动，然后执行“LSWRITE，n”命令（将覆盖序号为 N 的旧文件）。还可以使用系统编辑器直接编辑载荷步文件，但这种方法一般不推荐使用。与“LSREAD”命令等价的 GUI 菜单路径为：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Read LS File。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Read LS File。

（5）“LSDELE”命令允许从 ANSYS 程序中删除载荷步文件。与“LSDELE”命令等价的 GUI 菜单路径为：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Operate > Delete LS Files。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Operate > Delete LS Files。

（6）与载荷步相关的另一个有用的命令是“LSCLEAR”，该命令允许删除所有载荷，并将所有载荷步选项重新设置为其默认值。例如，在读取载荷步文件进行修改前，可以使用它“清除”所有载荷步数据。与“LSCLEAR”命令等价的 GUI 菜单路径为：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > All Load Data > data type。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Reset Options。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Settings > Replace vs Add。

GUI：Main Menu > Solution > Reset Options。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Replace vs Add > Reset Factors。

5.4 实例导航——导弹发动机药柱模型载荷施加

在前面章节中对药柱模型采用了不同的方法进行了网格划分，生成了可用于计算分析的有限元模型。接下来需要对药柱施加载荷，以此考察其承受温度和内压载荷的影响。为了更有针对性地模拟发动机工作过程药柱承受内压的环境，只考察在点火升压段的工作情况，因为该阶段的压强变化剧烈是药柱经常发生破坏的环节。

假设发动机工作时的药柱温度已经保温到-40℃（零应力温度为 58℃），发动机燃烧室内压强的变化如图 5-7 所示，约束掉药柱外表面的所有位移和两端面的轴向位移，另外根据结构对称性施加对称约束条件，且不考虑重力的影响。

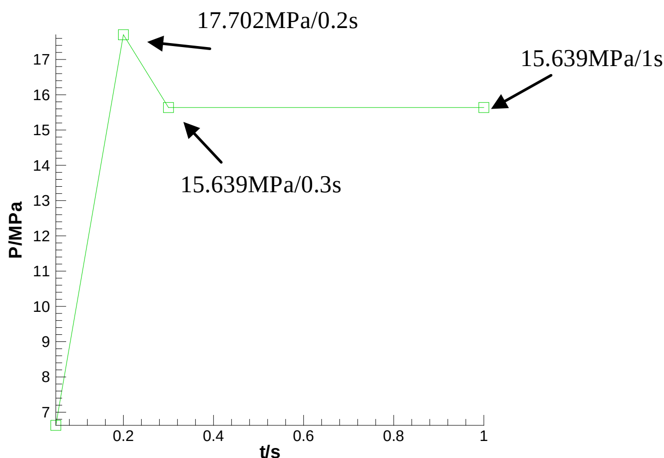


图 5-7 压强载荷随时间的变化

5.4.1 单载荷步的施加

为了让读者了解载荷的施加，从一个最基本的分析开始，单独只考虑低温-40℃时药柱内部残余热应力情况。该问题只存在一个温度载荷，施加载荷的步骤如下：

01 设定分析类型。

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis。由于该问题是做稳态分析，所以在弹出的对话框中选择“Statics”选项，如图 5-8 所示。

02 施加约束条件。

❶外表面位移约束。

GUI 操作：Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > on Areas，然后选择药柱外表面，在弹出的对话框中约束掉所有位移，如图 5-9 所示。

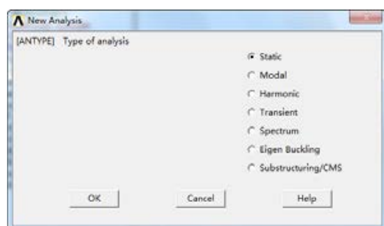


图 5-8 设定分析类型

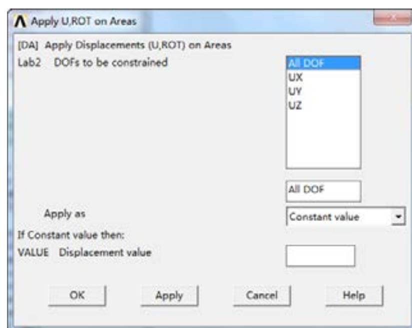


图 5-9 面约束条件设置

❷两端面位移约束。同上操作，将两端面的轴向位移（UZ）约束掉。

❸对称面约束。

GUI 操作：Main Menu > Solution > Define Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C. > on Areas，然后选择药柱的两个对称面，单击“OK”按钮完成对称约束设置。

完成整个约束设置之后的图形显示如图 5-10 所示。

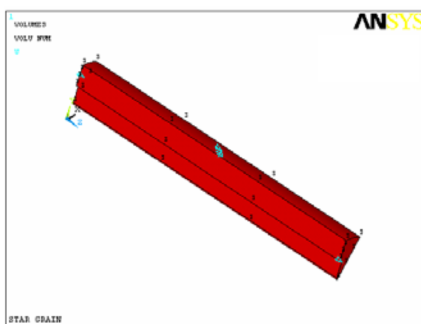


图 5-10 约束后的药柱

03 施加温度载荷。首先需要将温度的单位定义为摄氏温度，GUI：Main Menu > Prepocessor > Meterial Props > Tempreture Units，选择“Celsius”按钮 如图 5-11 所示。

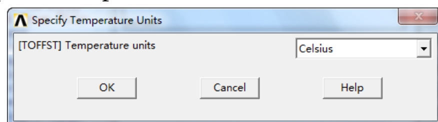


图 5-11 温度单位设置

温度载荷为体载荷，由于降温到-40℃，因此药柱会因为冷却收缩在药柱内部产生残

余热应力。施加温度载荷的时候，我们首先需要指定参考温度（零应力温度），GUI 操作：Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Reference Temp，在弹出的对话框中输入参考温度 58℃，如图 5-12 所示。

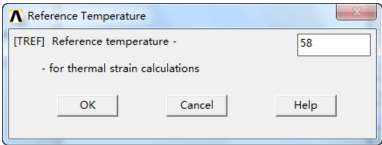


图 5-12 参考温度输入

施加温度体载荷的 GUI：Main Menu > Solution > Define Load > Apply > Structural > Temperature > On Volumes，在弹出的对话框输入温度载荷为常数值“-40℃”，如图 5-13 所示，至此完成温度载荷施加的全部过程。

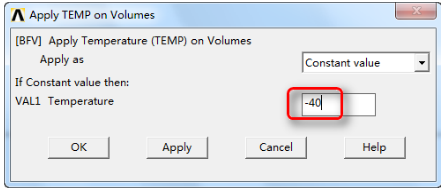


图 5-13 温度载荷输入

```
命令流格式：
/PREP7
!设置面组件
ASEL,S,AREA,,3,7,1
CM,INTERAREA,AREA
ALLSEL,ALL
TOFFST, 273.15          !温度单位为摄氏度
/SOLU
ANTYPE,STATIC
!定义约束
DA,9,ALL
DA,1,UZ,0
DA,10,UZ,0
DA,2,SYMM
DA,8,SYMM
!载荷步
BFV,ALL,TEMP,-40
TREF,58                 !参考温度为 58
```

5.4.2 多载荷步的施加

下面介绍多载荷步的施加步骤，假设药柱除了受到温度载荷之外，在点火过程中承

受的内压载荷如图 5-7 所示。

01 设定分析类型

GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis。由于该问题是做瞬态分析，所以在弹出的如图 5-8 所示的对话框中选择“Transient”按钮。

02 施加约束条件。

❶外表面位移约束。

GUI 操作：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > on Areas，然后选择药柱外表面，在弹出的对话框中约束掉所有位移，如图 5-9 所示。

❷两端面位移约束。同上操作，将两端面的轴向位移（UZ）约束掉。

❸对称面约束。

GUI 操作：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C. > on Areas，然后选择药柱的两个对称面，单击“OK”按钮完成对称约束设置。

03 施加温度载荷。因为是多载荷步，所以施加完之后需要将该载荷步保存。将该载荷步的结束时间设为“1e-6”，GUI 操作：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control，弹出的对话框中在“Time at end of loadstep”项中输入“1e-6”，在“Number of substeps”项中输入“1”（表示只设定一个子步），如图 5-14 所示。

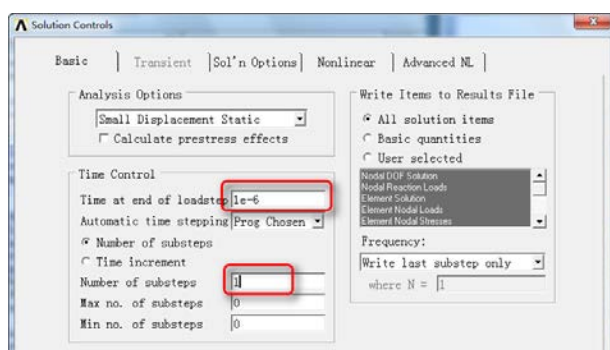


图 5-14 求解控制

按照之前施加温度载荷方法对药柱施加-40℃温度载荷，然后保存载荷步。GUI 操作：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Write LS File，在弹出的对话框中输入 1，如图 5-15 所示，这时可以发现文件夹中多出了一个“Grain.s01”文件，该文件保存了这一载荷步的信息。

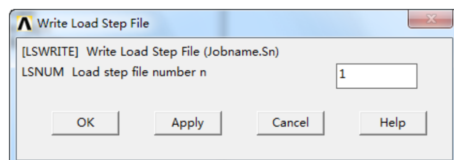


图 5-15 写入载荷步

04 施加压强载荷。根据本问题压强载荷的特点，可以分 3 个载荷步加载，分别对应于时间点 0.2s、0.3s 和 1s。

先定义 0.2s 时的载荷步。在求解控制“Basic”标签中，在“Time at end of loadstep”中输入 0.2，在“Number of substeps”中输入 5（子步数）。在求解控制“Transient”标签中，选择“Ramped Loading”（坡度载荷）。施加压强载荷 GUI 操作：Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > Structrual > Pressure > On Lines，分别选择内腔的几个表面，单击“OK”按钮，在弹出的对话框中输入压强常数值为“17.702MPa”，如图 5-16 所示。最后保存为载荷步 2。

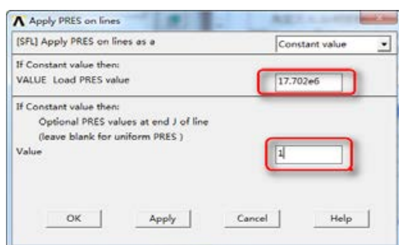


图 5-16 压强载荷输入

同理将 0.3s 和 1s 对应的载荷步分别保存为 3、4，子步数分别为 2 和 5。至此施加载荷已经完全结束，为更接近实际情况，载荷步四的压强载荷设置为阶跃载荷。

05 控制输出选项。

GUI 操作：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout，在弹出的对话框中选择“Every ubstep”选项，表示输出每一子步的结果，如图 5-17 所示。

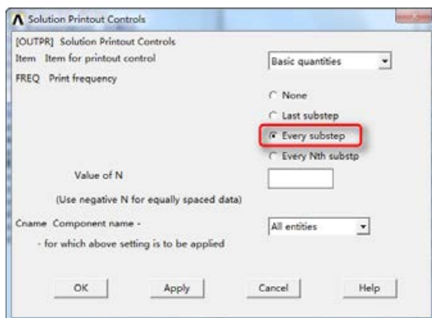


图 5-17 输出控制

命令流格式：

```
/PREP7
!面组件
ASEL,S,AREA,,3,7,1
CM,INTERAREA,AREA
ALLSEL,ALL
TOFFST, 273.15              !温度单位为摄氏度
/SOLU
```

```
ANTYPE,TRANS
!定义约束
DA,9,ALL
DA,1,UZ,ALL
DA,10,UZ,ALL
DA,2,SYMM
DA,8,SYMM
!载荷步一
TIME,1E-6
NSUBST,1
BFV,ALL,TEMP,-40
TREF,58                    !参考温度为 58
LSWRITE,1
!载荷步二
TIME,0.2
NSUBST,5
KBC,0
SFA,INTERAREA,,PRES,17.702E6
LSWRITE,2
!载荷步三
TIME,0.3
NSUBST,2
KBC,0
SFA,INTERAREA,,PRES,15.639E6
LSWRITE,3
!载荷步四
TIME,1
NSUBST,5
KBC,1
SFA,INTERAREA,,PRES,15.639E6
LSWRITE,4

FINISH
```

5.4.3 表格及函数载荷的施加

压强载荷的变化如表 5-18 所示。

表 5-18 压强载荷的变化

时间/s	0.2	0.3	1
压强/MPa	17.702	15.639	15.639

下面对压强载荷采用表格输入，之前约束和温度载荷的施加不再重复，对压强载荷的施加还可以通过如下操作来实现：

01 定义压强载荷函数。表 5-18 中压力函数有 3 个点，所以需要建立一个 3×1 的数组。GUI 操作：Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit，单击“Add”按钮，在弹出的对话框建立一个 3×1 的数组，如图 5-18 所示。单击“OK”按钮后返回数组对话框，然后单击“Edit”按钮编辑该数组，在弹出的对话框中按照图 5-19 设定，将第 0 列设定为时间，第 1 列设定为压强值。

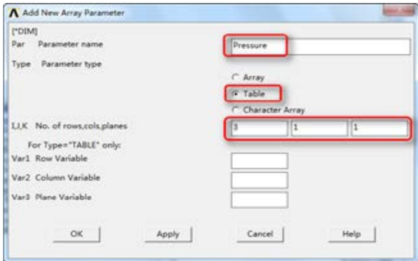


图 5-18 建立数组

02 施加载荷。现在已经定义了载荷历程，要加载并获得解答，需要构造一个如下所示的“DO”循环（通过使用命令*DO 和*ENDDO）。

施加压强载荷的部分命令流：

```
TM_START=1E-6                        ！开始时间（必须大于 0）
TM_END=1                             ！瞬态结束时间
TM_INCR=0.1                          ！时间增量
！从 TM_START 开始到 TM_END 结束，步长 TM_INCR
*DO,TM,TM_START,TM_END,TM_INCR
TIME,TM                              ！时间值
SFA,INTERAREA,,PRES,PRESSURE(TM)     ！随时间变化的压强
BF,ALL,TEMP,-40                      ！随时间变化的温度
SOLVE                                ！开始求解
*ENDDO
```

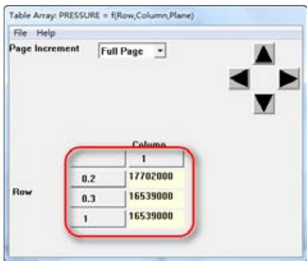


图 5-19 编辑数组

用这种方法，可以非常容易地改变时间增量（TM_INCR 参数），而用其他方法改变如此复杂的载荷历程的时间增量将是很麻烦的。

第 6 章

求解

建立完有限元分析模型之后，就需要在模型上施加载荷来检查结构或构件对一定载荷条件的响应。

本章将讲述 ANSYS 求解的基本设置方法和相关技巧。

学 习 要 点



- 利用特定的求解控制器来制定求解类型
- 多载荷步求解
- 重新启动分析
- 预测求解时间和估计文件大小

6.1 求解概论

ANSYS 能够求解由有限元方法建立的联立方程，求解的结果为：

（1）节点的自由度值，为基本解。

（2）原始解的导出值，为单元解。

单元解通常是在单元的公共点上计算出来的，ANSYS 程序将结果写入数据库和结果文件（Jobname.RST，RTH，RMG，RFL）。

ANSYS 程序中有几种解联立方程的方法：直接求解法、稀疏矩阵直接解法、雅克比共轭梯度法（JCG）、不完全分解共轭梯度法（ICCG）、预条件共轭梯度法（PCG）、自动迭代法（ITER）以及分块解法（DDS）。默认为直接解法，可用以下方法选择求解器。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analysis Options。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Options > Sol'n Control。

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Options。

命令：EQSLV。

如果没有“Analysis Options”选项，则需要完整的菜单选项，调出完整的菜单选项方法为 GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu。

表 6-1 提供了一般的准则，可能有助于针对给定的问题选择合适的求解器。

表 6-1 求解器选择准则

解法	典型应用场合	模型尺寸	内存使用	硬盘使用
直接求解法	要求稳定性（非线性分析）或内存受限制时	低于 50000 自由度	低	高
稀疏矩阵直接求解法	要求稳定性和求解速度（非线性分析）；线性分析时迭代收敛很慢时（尤其对病态矩阵，如形状不好的单元）	自由度为 10000～500000	中	高
雅克比共轭梯度法	在单场问题（如热、磁、声，多物理问题）中求解速度很重要时	自由度为 50000～1000000	中	低
不完全分解共轭梯度法	在多物理模型应用中求解速度很重要时，处理其他迭代法很难收敛的模型（几乎是无穷矩阵）	自由度为 50000～1000000	高	低
预条件共轭梯度法	当求解速度很重要时（大型模型的线性分析）尤其适合实体单元的大型模型	自由度为 50000～1000000	高	低
自动迭代法	类似于预条件共轭梯度法（PCG），不同的是，它支持 8 台处理器并行计算	自由度为 50000～1000000	高	低
分块解法	该解法支持数 10 台处理器通过网络连接来完成并行计算	自由度为 1000000～ 10000000	高	低

6.1.1 使用直接求解法

ANSYS 直接求解法不组集整个矩阵，而是在求解器处理每个单元时，同时进行整体矩阵的组集和求解，其方法如下：

（1）每个单元矩阵计算出后，求解器读入第一个单元的自由度信息。

（2）程序通过写入一个方程到 TRI 文件，消去任何可以由其他自由度表达的自由度，该过程对所有单元重复进行，直到所有的自由度都被消去，只剩下一个三角矩阵在 TRIN 文件中。

（3）程序通过回代法计算节点的自由度解，用单元矩阵计算单元解。

在直接求解法中经常提到“波前”这一术语，它是在三角化过程中因不能从求解器消去而保留的自由度数。随着求解器处理每个单元及其自由度时，波前就会膨胀和收缩，最后，当所有的自由度都处理过以后波前变为零。波前的最高值称为最大波前，而平均的、均方根值称为 RMS 波前。

一个模型的 RMS 波前值直接影响求解时间：其值越小，CPU 所用的时间越少，因此在求解前可能希望能重新排列单元号以获得最小的波前值。ANSYS 程序在开始求解时会自动进行单元排序，除非已对模型重新排列过或者已经选择了不需要重新排列。最大波前值直接影响内存的需要，尤其是临时数据申请的内存量。

6.1.2 使用稀疏矩阵直接求解法求解器

稀疏矩阵直接求解法是建立在与迭代法相对应的直接消元法基础上的。迭代法通过间接的方法（也就是通过迭代法）获得方程的解。既然稀疏矩阵直接求解法是以直接消元为基础的，不良矩阵不会构成求解困难。

稀疏矩阵直接求解法不适用于 PSD 光谱分析。

6.1.3 使用雅克比共轭梯度法求解器

雅克比共轭梯度法求解器也是从单元矩阵公式出发，但是接下来的步骤就不同了，雅克比共轭梯度法不是将整体矩阵三角化而是对整体矩阵进行组集，求解器于是通过迭代收敛法计算自由度的解（开始时假设所有的自由度值全为 0）。雅克比共轭梯度法求解器最适合于包含大型的稀疏矩阵三维标量场的分析，如三维磁场分析。

有些场合，“1.0E-8”的公差默认值（通过命令 EQSLV，JCG 设置）可能太严格，会增加不必要的运算时间，大多数场合 1.0E-5 的值就可满足要求。

雅克比共轭梯度法求解器只适用于静态分析、全谐波分析或全瞬态分析（可分别使用 ANTYPE，STATIC；HROPT，FULL；TRNOPT，FULL 命令指定分析类型 ）。

对所有的共轭梯度法，必须非常仔细地检查模型的约束是否恰当，如果存在任何刚体运动的话，将计算不出最小主元，求解器会不断迭代。

6.1.4 使用不完全分解共轭梯度法求解器

不完全分解共轭梯度法与雅克比共轭梯度法在操作上相似，除了以下几方面不同：

（1）不完全分解共轭梯度法比雅克比共轭梯度对病态矩阵更具有稳固性，其性能因矩阵调整状况而不同，但总的来说不完全分解共轭梯度法的性能比得上雅克比共轭梯度法的性能。

（2）不完全分解共轭梯度法比雅克比共轭梯度法使用更复杂的先决条件，使用不完全分解共轭梯度法需要大约两倍于雅克比共轭梯度法的内存。

不完全分解共轭梯度法只适用于静态分析，全谐波分析或全瞬态分析（可分别使用ANTYPE，STATIC；HROPT，FULL；TRNOPT，FULL 命令指定分析类型 ），不完全分解共轭梯度法对具有稀疏矩阵的模型很适用，对对称矩阵及非对称矩阵同样有效。不完全分解共轭梯度法比直接解法速度更快。

6.1.5 使用预条件共轭梯度法求解器

预条件共轭梯度法与雅克比共轭梯度法在操作上相似，除了以下几方面不同：

（1）预条件共轭梯度法解实体单元模型比雅克比共轭梯度法大约快 4～10 倍，对壳体构件模型大约快 10 倍，存储量随着问题规模的增大而增大。

（2）预条件共轭梯度法使用 EMAT 文件，而不是 FULL 文件。

（3）雅克比共轭梯度法使用整体装配矩阵的对角线作为预条件矩阵，预条件共轭梯度法使用更复杂的预条件矩阵。

（4）预条件共轭梯度法通常需要大约两倍于雅克比共轭梯度法的内存，因为在内存中保留了两个矩阵（预条件矩阵，它几乎与刚度矩阵大小相同；对称的、刚度矩阵的非零部分）。

可以使用“/RUNST”命令或 GUI 菜单路径（Main Menu > Run-Time Stas）来决定所需要的空间或波前的大小，需分配专门的内存。

预条件共轭梯度法所需的空间通常少于直接求解法的四分之一，存储量随着问题规模大小而增减。

预条件共轭梯度法通常解大型模型（波前值大于 1000）时比直接解法要快。

预条件共轭梯度法最适用于结构分析。它对具有对称、稀疏、有界和无界矩阵的单元有效，适用于静态或稳态分析和瞬态分析或子空间特征值分析（振动力学）。

预条件共轭梯度法主要解决位移/转动（在结构分析中）、温度（在热分析中）等问题，其他导出变量的准确度（如应力、压力、磁通量等）取决于原变量的预测精度。

直接求解的方法（如直接求解法，稀疏直接求解法）可获得非常精确的矢量解，而间接求解的方法（如预条件共轭梯度法）主要依赖于指定的收敛准则，因此放松默认公差将对精度产生重要影响，尤其对导出量的精度。

对具有大量的约束方程的问题或具有“SHELL150”单元的模型，建议不要采用预条

件共轭梯度法，对这些类型的模型可以采用直接求解法。同样，预条件件共轭梯度法不支持“SOLID63”和“MATRIX50”单元。

所有的共轭梯度法，必须非常仔细地检查模型的约束是否合理，如果有任何刚体运动，将计算不出最小主元，求解器会不断迭代。

当预条件共轭梯度法遇到一个无限矩阵，求解器会调用一种处理无限矩阵的算法，如果预条件共轭梯度法的无限矩阵算法也失败的话（这种情况出现在当方程系统是病态的，如子步失去联系或塑性链的发展），将会触发一个外部的“Newton-Raphson”循环，执行一个二等分操作，通常，刚度矩阵在二等分后将会变成良性矩阵，而且预条件共轭梯度法能够最终求解所有的非线性步。

6.1.6 使用自动迭代解法选项

自动迭代解法选项（通过命令 EQSLV，ITER）将选择一种合适的迭代法（PCG，JCG 等），它基于正在求解的问题的物理特性。使用自动迭代法时，必须输入精度水平，该精度必须是 1～5 之间的整数，用于选择迭代法的公差供检验收敛情况。精度水平 1 对应最快的设置（迭代次数少），而精度水平 5 对应最慢的设置（精度高，迭代次数多），ANSYS 选择公差是以选择精度水平为基础的。例如：

- 线性静态或线性全瞬态结构分析时，精度水平为 1，相当于公差为 1.0E-4，精度水平为 5，相当于公差为 1.0E-8。
- 稳态线性或非线性热分析时，精度水平为 1，相当于公差为 1.0E-5，精度水平为 5，相当于公差为 1.0E-9。
- 瞬态线性或非线性热分析时，精度水平为 1，相当于公差为 1.0E-6，精度水平为 5，相当于公差为 1.0E-10。

该求解器选项只适用于线性静态或线性全瞬态的瞬态结构分析和稳态/瞬态线性或非线性热分析。

因解法和公差以待求解问题的物理特性和条件为基础进行选择，建议在求解前执行该命令。

当选择了自动迭代选项，且满足适当条件时，在结构分析和热分析过程中将不会产生“Jobname.EMAT”文件和“Jobname.EROT”文件，对包含相变的热分析不建议使用该选项。当选择了该选项，但不满足恰当的条件时，ANSYS 将会使用直接求解的方法，并产生一个注释信息：告知求解时所用的求解器和公差。

6.1.7 获得解答

开始求解，进行以下操作：

GUI：Main Menu > Solution > Current LS or Run FLOTRAN。

命令：SOLVE。

因为求解阶段与其他阶段相比，一般需要更多的计算机资源，所以批处理（后台）模式要比交互式模式更适宜。

求解器将输出写入输出文件（Jobname.OUT）和结果文件中，如果以交互模式运行求解的话，输出文件就是屏幕。当执行“SOLVE”命令前使用下述操作，可以将输出送入一个文件而不是屏幕。

GUI：Utility Menu > File > Switch Output to > File or Output Window。

命令：/OUTPUT。

写入输出文件的数据由如下内容组成：

- 载荷概要信息。
- 模型的质量及惯性矩。
- 求解概要信息。
- 最后的结束标题，给出总的 CPU 时间和各过程所用的时间。
- 由“OUTPR”命令指定的输出内容已及绘制云纹图所需的数据。

在交互模式中，大多数输出是被压缩的，结果文件（RST，RTH，RMG 或 RFL）包含所有的二进制方式的文件，可在后处理程序中进行浏览。

在求解过程中产生的另一有用文件是“Jobname.STAT”文件，它给出了解答情况。程序运行时可用该文件来监视分析过程，对非线性和瞬态分析的迭代分析尤其有用。

SOLVE 命令还能对当前数据库中的载荷步数据进行计算求解。

6.2 利用特定的求解控制器来指定求解类型

当在求解某些结构分析类型时，可以利用如下两种特定的求解工具：

- “Abridged Solution”菜单选项：只适用于静态，全瞬态，模态和屈曲分析类型。
- 求解控制对话框：只适用于静态和全瞬态分析类型。

6.2.1 使用Abridged Solution 菜单选项

当使用图形界面方式进行一结构静态，瞬态，模态或者屈曲分析时，将选择是否使用“abridged”或者“unabridged Solution”菜单选项：

（1）“Unabridged Solution”菜单选项列出了在当前分析中可能使用的所有求解选项，无论其是被推荐的还是可能的（如果在当前分析中不可能使用的选项，那么其将层现灰色）。

（2）“Abridged Solution”菜单选项较为简易，仅仅列出了分析类型所必需的求解选项。例如，当进行一静态分析时，选项“Modal Cyclic Sym”将不会出现在“abridged Solution ”菜单选项中，只有那些有效且被推荐的求解选项才出现。

当一结构分析中，当进入“SOLUTION”模块（GUI 菜单路径：Main Menu > Solution）时，“abridged Solution ”菜单选项为默认值。

当进行的分析类型是静态或全瞬态时，可以通过这种菜单完成求解选项的设置。然而，如果选择了不同的一个分析类型，“abridged Solution”菜单选项的默认值将被一个不同的 Solution 菜单选项所代替，而新的菜单选项将符合新选择的分析类型。

当进行分析后又选择一个新的分析类型，那么将（默认地）得到和第一次分析相同的 Solution 菜单选项类型。例如，当选择使用“unabridged Solution”菜单选项来进行一个静态分析后，又选择进行一个新的屈曲分析，此时将得到（默认）适用于屈曲分析“unabridged Solution”菜单选项。但是，在分析求解阶段的任何时候，通过选择合适的菜单选项，都可以在“unabridged ”和“abridged Solution ”菜单选项之间切换（GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Unabridged Menu 或 Main Menu > Solution > Abridged Menu）。

6.2.2 使用求解控制对话框

当进行一结构静态或全瞬态分析时，可以使用求解控制对话框来设置分析选项。求解控制对话框包括 5 个选项，每个选项包含一系列的求解控制。对于指定多载荷步分析中每个载荷步的设置，求解控制对话框是非常有用的。

只要进行结构静态或全瞬态分析，那求解菜单必然包含求解控制对话框选项。当单击“Sol'n Control”菜单项，弹出如图 6-1 所示的求解控制对话框。这一对话框为提供了简单的图形界面来设置分析和载荷步选项。

一旦打开求解控制对话框，“Basic”标签页被激活，如图 6-1 所示。完整的标签页按顺序从左到右依次是：Basic，Transient，Sol'n Options，Nonlinear，Advanced NL。

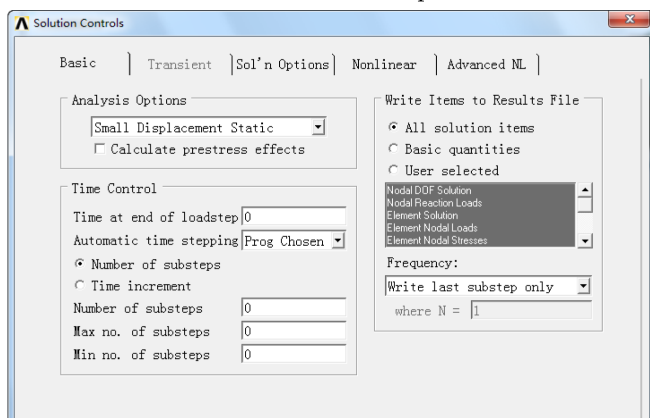


图 6-1 求解控制对话框

每套控制逻辑上分在一个标签页里，最基本的控制出现在第一个标签页里，而后续的标签页里提供了更高级的求解控制选项。“Transient”标签页包含瞬态分析求解控制，仅当分析类型为瞬态分析时才可用，否则层现灰色。

每个求解控制对话框中的选项对应一个 ANSYS 命令，如表 6-2 所示。

表 6-2 求解控制对话框

求解控制对话框标签页	用途	对应的命令
Basic	指定分析类型 控制时间设置 指定写入 ANSYS 数据库中结果数据	ANTYPE，NLGEOM，TIME，AUTOTS，NSUBST，DELTIM，OUTRES
Transient	指定瞬态选项 指定阻尼选项 定义积分参数	TIMINT，KBC，ALPHAD，BETAD，TINTP
Sol'n Options	指定方程求解类型 指定重新多个分析的参数	EQSLV，RESCONTROL
Nonlinear	控制非线性选项 指定每个子步迭代的最大次数 指明是否在分析中进行蠕变计算 控制二分法 设置收敛准则	LNSRCH，PRED，NEQIT，RATE，CUTCONTROL，CNVTOL
Advanced NL	指定分析终止准则 控制弧长法的激活与中止	NCNV，ARCLEN，ARCTRM

一旦对“Basic”标签页的设置满意，那么就不需要对其余的标签页选项进行处理，除非想要改变某些高级设置。

无论对一个或多个标签页进行改变，仅当单击“OK”按钮关闭对话框后，这些改变才被写入 ANSYS 数据库。

6.3 多载荷步求解

6.3.1 多重求解法

这种方法是最直接的，它包括在每个载荷步定义好后执行 SOLVE 命令。主要的缺点是，在交互使用时必须等到每一步求解结束后才能定义下一个载荷步，典型的多重求解法命令流如下：

```
/SOLU                    ! 进入 SOLUTION 模块
...
! Load step 1:           ! 载荷步 1
D,...
SF,...
0
SOLVE                    ! 求解载荷步 1
! Load step 2            ! 载荷步 2
```

```
F,...
SF,...
...
SOLVE                         ！求解载荷步 2
Etc.
```

6.3.2 使用载荷步文件法

当想求解问题而又远离终端或 PC 时（如整个晚上），可以很方便地使用载荷步文件法。该方法包括写入每一载荷步到载荷步文件中（通过 LSWRITE 命令或相应的 GUI 方式），通过一条命令就可以读入每个文件并获得解答（参见第 3 章了解产生载荷步文件的详细内容）。

要求解多载荷步，有如下两种方式：

GUI：Main Menu > Solution > From Ls Files。

命令：LSSOLVE。

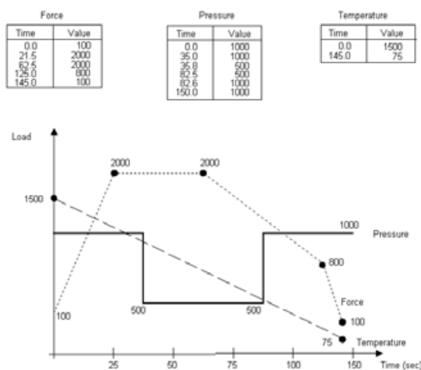
LSSOLVE 命令其实是一条宏指令，它按顺序读取载荷步文件，并开始每一载荷步的求解。载荷步文件法的示例命令输入如下：

```
/SOLU                         ！进入求解模块
...
! Load Step 1:                ！载荷步 1
D,...                         ！施加载荷
SF,...
...
NSUBST,...                    ！载荷步选项
KBC,...
OUTRES,...
OUTPR,...
...
LSWRITE                       ！写载荷步文件：Jobname.S01
! Load Step 2:
D,...
SF,...
...
NSUBST,...                    ！载荷步选项
KBC,...
OUTRES,...
OUTPR,...
...
LSWRITE                       ！写载荷步文件：Jobname.S02
...
0
LSSOLVE,1,2                   ！  开始求解载荷步文件 1 和 2
```

6.3.3 使用数组参数法（矩阵参数法）

主要用于瞬态或非线性静态（稳态）分析，需要了解有关数组参数和 DO 循环的知识，这是 APDL（ANSYS 参数设计语言）中的部分内容，详细内容可以参考 ANSYS 帮助文件中的“APDL PROGRAMMER’S GUIDE”了解 APDL。数组参数法包括用数组参数法建立载荷—时间关系表，下面给出了最好的解释。

假定有一组随时间变化的载荷，如图 6-2 所示。有 3 个载荷函数，所以需要定义 3 个数组参数，所有的 3 个数组参数必须是表格形式，力函数有 5 个点，所以需要一个 5×1 的数组，压力函数需要一个 6×1 的数组，而温度函数需要一个 2×1 的数组，注意到三个数组都是一维的，载荷值放在第一列，时间值放在第 0 列（第 0 列、0 行，一般包含索引号，如果把数组参数定义为一张表格的话，第 0 列、0 行必须改变，且填上单调递增的编号组）。



Force

Time	Value
0.0	100
21.5	2000
62.5	2000
125.0	800
145.0	100

Pressure

Time	Value
0.0	1000
35.0	1000
35.8	500
82.5	500
82.6	1000
150.0	1000

Temperature

Time	Value
0.0	1500
145.0	75

图 6-2 随时间变化的载荷示例

要定义 3 个数组参数，必须申明其类型和维数，要做到这一点，可以使用以下两种方式：

GUI：Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit。

命令：*DIM。

例如：

```
*DIM,FORCE,TABLE,5,1
*DIM,PRESSURE,TABLE,6,1
*DIM,TEMP,TABLE,2,1
```

可用数组参数编辑器（GUI：Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit）或者一系列‘＝’命令填充这些数组，后一种方法如下：

```
FORCE(1,1)=100,2000,2000,800,100          ！第 1 列力的数值
FORCE(1,0)=0,21.5,50.9,98.7,112           ！第 0 列对应的时间
FORCE(0,1)=1                                ！第 0 行
PRESSURE(1,1)=1000,1000,500,500,1000,1000
PRESSURE(1,0)=0,35,35.8,74.4,76,112
```

```
PRESSURE(0,1)=1
TEMP(1,1)=800,75
TEMP(1,0)=0,112
TEMP(0,1)=1
```

现在已经定义了载荷历程，要加载并获得解答，需要构造一个如下所示的 DO 循环（通过使用命令*DO 和*ENDDO）：

```
TM_START=1E-6                          ！开始时间（必须大于 0）
TM_END=112                             ！瞬态结束时间
TM_INCR=1.5                            ！时间增量
！从 TM_START 开始到 TM_END 结束，步长 TM_INCR
*DO,TM,TM_START,TM_END,TM_INCR
TIME,TM                                ！时间值
F,272,FY,FORCE(TM)                     ！随时间变化的力（节点 272 处，方向 FY）
NSEL,...                               ！在压力表面上选择节点
SF,ALL,PRES,PRESSURE(TM)               ！随时间变化的压力
NSEL,ALL                               ！激活全部节点
NSEL,...                               ！选择有温度指定的节点
BF,ALL,TEMP,TEMP(TM)                   ！随时间变化的温度
NSEL,ALL                               ！激活全部节点
SOLVE                                  ！开始求解
*ENDDO
```

用这种方法，可以非常容易地改变时间增量（TM_INCR 参数），用其他方法改变如此复杂的载荷历程的时间增量将是很麻烦的。

6.4 重新启动分析

有时，在第一次运行完成后也许要重新启动分析过程，例如想将更多的载荷步加到分析中来，在线性分析中也许要加入别的加载条件，或在瞬态分析中加入另外的时间历程加载曲线，或者在非线性分析收敛失败时需要恢复。

在了解重新开始求解之前，有必要知道如何中断正在运行的作业。通过系统的帮助函数，如系统中断，发出一个删除信号，或在批处理文件队列中删除项目。然而，对于非线性分析，这不是好的方法。因为以这种方式中断的作业将不能重新启动。

在一个多任务操作系统中完全中断一个非线性分析时，会产生一个放弃文件，命名为“Jobname.ABT”（在一些区分大小的系统上，文件名为“Jobname.abt”）。第一行的第一列开始含有单词“非线性”。在平衡方程迭代的开始，如果 ANSYS 程序发现在工作目录中有这样一个文件，分析过程将会停止，并能在以后的时候重新启动。

若通过指定的文件来读取命令（/INPUT）（GUI 路径：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Library，或 Utility Menu > File > Read Input from），那么放弃文件将会中断求解，但程序依然继续从这个指定的输入文件中读取命令。于是，任何包含在这个输入文件中的后处理命令将会被执行。

要重新启动分析，模型必须满足如下条件：

（1）分析类型必须是静态（稳态）、谐波（二维磁场）或瞬态（只能是全瞬态），其他的分析不能被重新启动。

（2）在初始运算中，至少已完成了一次迭代。

（3）初始运算不能因“删除”作业、系统中断或系统崩溃被中断。

（4）初始运算和重启动必须在相同的 ANSYS 版本下进行。

6.4.1 重新启动一个分析

通常一个分析的重新启动要求初始运行作业的某些文件，并要求在“SOLVE”命令前没有进行任何的改变。

1．重启动一个分析的要求

在初始运算时必须得到以下文件：

（1）Jobname.DB 文件：在求解后，POST1 后处理之前保存的数据库文件，必须在求解以后保存这个文件，因为许多求解变量在求解程序开始以后设置的，在进入 POST1 前保存该文件，因为在后处理过程中，SET 命令（或功能相同的 GUI 菜单路径）将用这些结果文件中的边界条件改写存储器中的已经存在的边界条件。接下来的 SAVE 命令将会存储这些边界条件（对于非收敛解，数据库文件是自动保存的）。

（2）Jobname.EMAT 文件：单元矩阵。

（3）Jobname.ESAV 或 Jobname.OSAV 文件：Jobname.ESAV 文件保存单元数据，Jobname.OSAV 文件保存旧的单元数据。Jobname.OSAV 文件只有当 Jobname.ESAV 文件丢失、不完整或由于解答发散，或因位移超出了极限，或因主元为负引起 Jobname.ESAV 文件不完整或出错时才用到（如表 6-2 所示）。在 NCNV 命令中，如果 KSTOP 被设为 1（默认值）或 2、或自动时间步长被激活，数据将写入 Jobname.OSAV 文件中。如果需要 Jobname.OSAV 文件，必须在重新启动时把它改名为 Jobname.ESAV 文件。

（4）结果文件：不是必需的，但如果有，重新启动运行得出的结果将通过适当的有序的载荷步和子步号追加到这个文件中去。如果因初始运算结果文件的结果设置数超出而导致中断的话，需在重新启动前将初始结果文件名改为另一个不同文件名。这可以通过执行 ASSIGN 命令（或 GUI 菜单路径：Utility Menu > File > ANSYS File Options）实现。

如果由于不收敛、时间限制、中止执行文件（Jobname.ABT）或其他程序诊断错误引起程序中断的话，数据库会自动保存，求解输出文件（Jobname.OUT 文件）会列出这些文件和其他一些在重新启动时所需的信息。中断原因和重新启动所需的保存的单元数据文件如表 6-3 所示。

如果在先前运算中产生.RDB, .LDHI 或.Rnnn 文件，那么必须在重新启动前删除它们。

在交互模式中，已存在的数据库文件会首先写入到备份文件（Jobname.DBB）中。

在批处理模式中，已存在的数据库文件会被当前的数据库信息所替代，不进行备份。

表 6-3 非线性分析重新启动信息

中断原因	保存的单元数据库文件	所需的正确操作
正常	Jobname.ESAV	在作业的末尾添加更多载荷步
不收敛	Jobname.OSAV	定义较小的时间步长，改变自适应衰减选项或采取其他措施加强收敛，在重新启动前把 Jobname.OSAV 文件名改为 Jobname.ESAV 文件
因平衡迭代次数不够引起的不收敛	Jobname.ESAV	如果解正在收敛，允许更多的平衡方程式（ENQIT 命令）
超出累积迭代极限（NCNV 命令）	Jobname.ESAV	在 NCNV 命令中增加 ITLIM
超出时间限制（NCNV 命令）	Jobname.ESAV	无（仅需要重新启动分析）
超出位移限制（NCNV 命令）	Jobname.OSAV	与不收敛情况相同
主元为负	Jobname.OSAV	与不收敛情况相同
Jobname.ABT 文件 解是收敛的 解是分散的	 Jobname.EMAV, Jobname.OSAV	做任何必要的改变，以便能访问引起主动中断分析的行为
结果文件“满”（超过 1000 子步），时间步长输出	Jobname.ESAV	检查 CNVTOL，DELTIM 和 NSUBST 或 KEYOPT（7）中的接触单元的设置，或在求解前在结果文件（/CONFIG，NRES）中指定允许的较大的结果数，或减少输出的结果数，还要为结果文件改名（/ASSIGN）
“删除”操作（系统中断），系统崩溃，或系统超时	不可用	不能重新启动

2．重启动一个分析的过程

（1）进入 ANSYS 程序，给定与第一次运行时相同的文件名（执行/FILNAME 命令或 GUI 菜单路径：Utility Menu > File > Change Jobname）。

（2）进入求解模块（执行命令/SOLU 或 GUI 菜单路径：Main Menu > Solution），然后恢复数据库文件（执行命令 RESUME 或 GUI 菜单路径：Utility Menu > File > Resume Jobname.db）。

（3）说明这是重新启动分析（执行命令 ANTYPE,,REST 或 GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Restart）。

（4）按需要规定修正载荷或附加载荷，从前面的载荷值调整坡道载荷的起始点，新加的坡道载荷从零开始增加，新施加的体积载荷从初始值开始。删除的重新加上的载荷可视为新施加的负载，而不用调整。待删除的表面载荷和体积载荷，必须减小至零或到

初始值，以保持“Jobname.ESAV”文件和“Jobname.OSAV”文件的数据库一样。

如果是从收敛失败重新启动的话，务必采取所需的正确操作。

（5）指定是否要重新使用三角化矩阵（Jobname.TRI 文件)，可用以下操作：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Other > Reuse Tri Matrix。

GUI：Main Menu > Solution > Other > Reuse Tri Matrix。

命令：KUSE

默认时，ANSYS 为重启动第一载荷步计算新的三角化矩阵，通过执行 KUSE，1 命令，可以迫使允许再使用已有的矩阵，这样可节省大量的计算时间。然而，仅在某些条件下才能使用“Jobname.TRI”文件，尤其当规定的自由度约束没有发生改变，且为线性分析时。

通过执行“KUSE，-1”，可以使 ANSYS 重新形成单元矩阵，这样对调试和处理错误是有用的。

有时，可能需根据不同的约束条件来分析同一模型，如一个四分之一对称的模型（具有对称－对称（SS），对称－反对称（SA），反对称－对称（AS）和反对称－反对称（AA）条件）。在这种情况下，必须牢记以下几点：

- 4 种情况（SS, SA, AS, AA）都需要新的三角形矩阵。
- 可以保留 Jobname.TRI 文件的副本用于各种不同工况，在适当时候使用。
- 可以使用子结构（将约束节点作为主自由度）以减少计算时间。

（6）发出“SOLVE”命令初始化重新启动求解。

（7）对附加的载荷步（若有的话）重复步骤 4、5 和 6，或使用载荷步文件法产生和求解多载荷步，使用下述命令：

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Write LS File。

GUI：Main Menu > Solution > Write LS File。

命令：LSWRITE

GUI：Main Menu > Solution > From LS Files。

命令：LSSOLVE

（8）按需要进行后处理，然后推出 ANSYS。

重新启动输入列表示例如下：

```
!    Restart run：
/FILNAME,...                    ! 工作名
RESUME
/SOLU
ANTYPE,,REST                    ! 指定为前述分析的重新启动
!
! 指定新载荷、新载荷步选项等
! 对非线性分析，采用适当的正确操作
!
SOLVE                           ! 开始重新求解
SAVE                            ! SAVE 选项供后续可能进行的重新启动使用
```

```
FINISH
！按需要进行后处理
/EXIT,NOSAV
```

3．从不兼容的数据库重新启动非线性分析

有时，后处理过程先于重新启动，如果在后处理期间执行 SET 命令或 SAVE 命令的话，数据库中的边界条件会发生改变，变成与重新启动分析所需的边界条件不一致。默认条件下，程序在退出前会自动保存文件。在求解的结束时，数据库存储器中存储的是最后的载荷步的边界条件（数据库只包含一组边界条件）。

POST1 中的 SET 命令（不同于 SET，LAST）为指定的结果将边界条件读入数据库，并改写存储器中的数据库。如果接下来保存或推出文件，ANSYS 会从当前的结果文件开始，通过 D’S 和 F’S 改写数据库中的边界条件。然而，要从上一求解子步开始执行边界条件变化的重启动分析，需有求解成功的上一求解子步边界条件。

要为重新启动重建正确的边界条件，首先要运行“虚拟”载荷步，过程如下：

（1）将“Jobname.OSAV”文件改名为“Jobname.ESAV”文件。

（2）进入 ANSYS 程序，指定使用与初始运行相同的文件名（可执行命令/FILNAME 或 GUI 菜单路径：Utility Menu > File > Change Jobname）。

（3）进入求解模块（执行命令/SOLU 或 GUI 菜单路径：Main Menu > Solution），然后恢复数据库文件（执行命令 RESUME 或 GIU 菜单路径：Utility Menu > File > Resume Jobname.db）。

（4）说明这是重新启动分析（执行命令 ANTYPE,,REST 或 GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Restart）。

（5）从上一次已成功求解过的子步开始重新规定边界条件，因解答能够立即收敛，故一个子步就够了。

（6）执行“SOLVE”命令。GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Current LS 或 Main Menu > Solution > Run FLOTRAN。

（7）按需要施加最终载荷及加载步选项。如加载步为前面（在虚拟前）加载步的延续，需调整子步的数量（或时间步步长），时间步长编号可能会发生变化，与初始意图不同。如需要保持时间步长编号（如瞬态分析），可在步骤 6 中使用一个小的时间增量。

（8）重新开始一个分析的过程。

6.4.2 多载荷步文件的重启动分析

当进行一个非线性静态或全瞬态结构分析时，ANSYS 程序在默认情况下为多载荷步文件的重启动分析建立参数。多载荷步文件的重启动分析允许在计算过程中的任一子步保存分析信息，然后在这些子步中一个处重新启动。在初始分析之前，应该执行命令“RESCONTROL”来指定在每个运行载荷子步中重新启动文件的保存频率。

当需要重启动一个作业时，使用“ANTYPE”命令来指定重新启动分析的点及其分析类型。可以继续作业从重启动点（进行一些必要的纠正）或者在重启动点终止一个载

荷步（重新施加这个载荷步的所有载荷）然后继续下一个载荷步。

如果想要终止这种多载荷步文件的重新启动分析特性而改用一个文件的重新启动分析，执行“RESCONTROL,DEFINE,NONE”命令，接着如上所述进行单个文件重新启动分析（命令：ANTYPE,,REST），当然保证.LDHI，.RDB 和.Rnnn 文件已经从当前目录中被删除。

如果使用求解控制对话框进行静态或全瞬态分析，那么就能够在求解对话框选项标签页中指定基本的多载荷重新启动分析选项。

1．多载荷步文件重启动分析的要求

（1）Jobname.RDB：ANSYS 程序数据库文件，在第一载荷步，第一工作子步的第一次迭代中被保存。此文件提供了对于给定初始条件的完全求解描述，无论对作业重新启动分析多少次，其都不会改变。当运行一作业时，在执行“SOLVE”命令前应该输入所有需要求解的信息，包括参数语言设计（APDL），组分，求解设置信息）。在执行第一个“SOLVE”命令前，如果没有指定参数，那么参数将被保存在.RDB 文件中。 这种情况下，必须在开始求解前执行“PARSAV”命令并且在重新启动分析时执行“PARRES”命令来保存并恢复参数。

（2）Jobname.LDHI：此文件是指定作业的载荷历程文件。此文件是一个 ASCII 文件，相似于用命令“LSWRITE”创建的文件，并存储每个载荷步所有的载荷和边界条件。载荷和边界条件以有限单元载荷的形式被存储。如果载荷和边界条件是施加在实体模型上的，载荷和边界条件将先被转化为有限单元载荷，然后存入“Jobname.LDHI”文件。当进行多载荷重启动分析时，ANSYS 程序从此文件读取载荷和边界条件（相似于 LSREAD 命令）。此文件在每个载荷步结束时或当遇到“ANTYPE,,REST，LDSTEP，SUBSTEP，ENDSTEP”这些命令时被修正。

（3）Jobname.Rnnn：与.ESAV 或.OSAV 文件相似，也是保存单元矩阵的信息。这一文件包含了载荷步中特定子步的所有求解命令及状态。所有的.Rnnn 文件都是在子步运算收敛时被保存，因此所有的单元信息记录都是有效的。如果一个子步运算不收敛，那么对应于这个子步，没有.Rnnn 文件被保存，代替的是先前一子步运算的.Rnnn 文件。

多载荷步文件的重启动分析有以下几个限制：

（1）不支持“KUSE”命令。一个新的刚度矩阵和相关.TRI 文件产生。

（2）在“.Rnnn”文件中没有保存“EKILL”和“EALIVE”命令，如果“EKILL”或“EALIVE” 命令在重启动过程中需要执行，那么必须自己执行这些命令。

（3）“.RDB”文件仅仅保存在第一载荷步的第一个子步中可用的数据库信息。

（4）不能够在求解水平下重启作业（例如，PCG 迭代水平）。作业能够被重启动分析在更低的水平（例如，瞬时或“Newton-Raphson”循环）。

（5）当使用弧长法时，多载荷文件重新启动分析不支持命令 ANTYPE 的“ENDSTEP”选项。

（6）所有的载荷和边界条件存储在“Jobname.LDHI”文件中，因此，删除实体模型的载荷和边界条件将不会影响从有限单元中删除这些载荷和边界条件。必须直接从单

元或节点中删除这些条件。

2．多载荷步文件重启动分析的过程

（1）进入 ANSYS 程序，指定与初始运行相同的工作名（执行/FILNAME 命令或 GUI 菜单路径：Utility Menu > File > Change Jobname）。进入求解模块（执行/SOLU 命令或 GUI 菜单路径：Main Menu > Solution）。

（2）通过执行“RESCONTROL，FILE_SUMMARY”命令决定从哪个载荷步和子步重新启动分析。这一命令将在.Rnnn 文件中记录载荷步和子步的信息。

（3）恢复数据库文件并表明这是重新启动分析（执行 ANTYPE,,REST，LDSTEP，SUBSTEP，Action 命令或 GUI 菜单路径 Main Menu > Solution > Restart）。

（4）指定修正或附加的载荷。

（5）开始重新求解分析（执行“SOLVE”命令)。必须执行“SOLVE”命令，当进行任一重新启动行为时，包括“ENDSTEP”或“RSTCREATE”命令。

（6）进行需要的后处理，然后推出 ANSYS 程序。

在分析中对特定的子步创建结果文件示例如下：

```
！ Restart run:
/solu
antype,,rest,1,3,rstcreate              ！ 创建.RST 文件
！ step 1, substep 3
outres,all,all                          ！ 存储所有的信息到.RST 文件中
outpr,all,all                           ！ 选择打印输出
solve                                   ！ 执行.RST 文件生成
finish
/post1
set,,1,3                                ！ 从载荷步 1 获得结果
！ substep 3
prnsol
finish
```

6.5 预测求解时间和估计文件大小

对不太复杂的、“小规模到中等规模”的 ANSYS 分析，大多数会按本章前面所述简单地开始求解。然而，对大模型或有复杂的非线性选项，应该了解在开始求解前需要些什么。

例如：分析求解需要多长时间？在运行之前需要多少磁盘空间？该分析需要多少内存？尽管没有准确的方法预计这些量，ANSYS 程序可在“RUNSTAT”模块中进行估算。“RUNSTAT”模块根据数据库中的信息估计运行时间和其他统计量。因此，必须在键入/RUNSTAT 命令前定义模型几何量（节点、单元等）、载荷以及载荷选项、分析选项。在开始求解前使用“RUNSTAT”命令。

6.5.1 估计运算时间

要估算运行时间，ANSYS 程序需要计算机的性能信息：“MIPS”（每秒钟执行的指令数，以百万计），“MELOPS”（每秒钟进行的浮点运算，以百万计）等。可执行“RSPEED”命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > Run-Time Stats > System Settings）获得该信息。

如果不清楚计算机这些细节，可用宏操作“SETSPEED”，它会代替执行“RSPEED”命令。

估算分析过程总运行时间所需的其他信息有迭代次数（或线性、静态分析中的载荷步数），要获得这些信息，可用下述两种方法中任一种：

GUI：Main Menu > Run-Time Stats > Iter Setting。

命令：RITER。

要获得运行时间估计，可用下述可用下述两种方法中任一种：

GUI：Main Menu > Run-Time Stats > Individual Stats。

命令：RTIMST。

根据由“RSPEED”和“RITER”命令所提供的信息和数据库中的模型信息，“RTIMST”命令会给提供运行时间估计值。

6.5.2 估计文件的大小

RFILSZ 命令可以估计以下文件的大小：ESAV，EMAT，EROT，.TRI，.FULL，.RST，.RTH .RMG 和.RFL 文件。与“RFILSZ” 命令相同的图形界面方式与“RTIMST”命令的图形界面方式相同。结果文件估计值基于一组结果（一个子步），要将其乘以实际结果文件规模总数。

6.5.3 估计内存需求

执行“RWFRNT”命令（或通过 GUI 菜单路径：Main Menu > Run-Time Stats > Individual Stats）可以估计求解所需的内存，可通过 ANSYS 工作空间的入口选项申请内存量。如果以前没有重新排列过单元，执行“RWFRNT”命令可以自动重新排列单元。“RSTAT”命令将给出模型节点和单元信息的统计量，“RMEMRY”命令将给出内存统计量。

“RALL”命令是同时执行“RSTAT”，“RWFRNT”，“RTIMST”和“RMEMRY” 4 条命令的一条简便命令（GUI 菜单路径：Main Menu > Run-Time Stats > All Statistics）。除了“RALL”命令，其他几条命令的 GUI 菜单路径都为：Main Menu > Run-Time Stats > Individual Stats。

6.6 实例导航——导弹发动机药柱模型求解

接上章中实例分析，对药柱模型施加载荷之后，本节主要对求解选项进行相关设定。

6.6.1 单载荷步求解

对于单载荷步，在施加完载荷之后，直接就可以求解。GUI 操作：Main Menu > Solution > Current LS，在弹出的对话框中单击“OK”按钮即可以进行求解，如图 6-3 所示。

命令流：
SOLVE

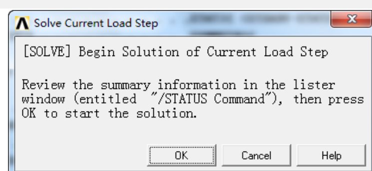


图 6-3 求解当前载荷步

6.6.2 多载荷步求解

如前所述，多载荷步求解法有 3 种方法，这里只针对应用最广也是最方便的载荷步文件法进行举例说明。对于多载荷步，因为之前在施加载荷时已经分别保存了每一个载荷步的信息，所以进行求解的时候需要将之前的载荷步文件重新读入，GUI 操作：Main Menu > Solution > From Ls Files，在弹出的对话框中，将“LSMIN”设定为 1（起始载荷步），“LSMAX”设定为 4（终止载荷步），“LSINC”设定为 1（载荷步递增数），如图 6-4 所示，单击“OK”按钮后即可以进行多载荷步文件的求解。

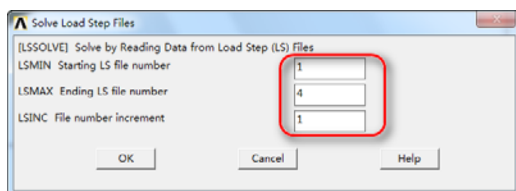


图 6-4 载荷步文件设置

命令流：
LSSOLVE,1,4,1

对于采用表格施加载荷和求解因为前一章已经介绍过，故本节不再重复。

第 7 章

后处理

后处理指检阅 ANSYS 分析的结果，这是 ANSYS 分析中最重要的一个模块。通过后处理的相关操作，可以有针对性地得到分析过程所感兴趣的参数和结果，更好地为实际服务。

学 习 要 点

- 后处理概论
- 通用后处理（POST1）
- 时间历程后处理（POST26）

7.1 后处理概述

建立有限元模型并求解后，你将想要得到一些关键问题答案：该设计投入使用时，是否真的可行？某个区域的应力有多大?零件的温度如何随时间变化？通过表面的热损失有多少？磁力线是如何通过该装置的？物体的位置是如何影响流体的流动的？ANSYS 软件的后处理会帮助回答这些问题和其他相关的问题。

7.1.1 什么是后处理

后处理是指检查分析的结果。这可能是分析中最重要的一环，因为你总是试图搞清楚作用载荷如何影响设计，单元划分好坏等。

检查分析结果可使用两个后处理器：通用后处理器 POST1 和时间历程后处理器 POST26。POST1 允许检查整个模型在某一载荷步和子步（或对某一特定时间点或频率）的结果。例如：在静态结构分析中，可显示载荷步 3 的应力分布；在热力分析中，可显示 time=100s 时的温度分布。图 7-1 所示的等值线图是一种典型的 POST1 图。

POST26 可以检查模型的指定点的特定结果相对于与时间、频率或其他结果项的变化。例如，在瞬态磁场分析中，可以用图形表示某一特定单元的涡流与时间的关系；或在非线性结构分析中，可以用图形表示某一特定节点的受力与其变形的关系。图 7-2 中的曲线图是一典型的 POST26 图。

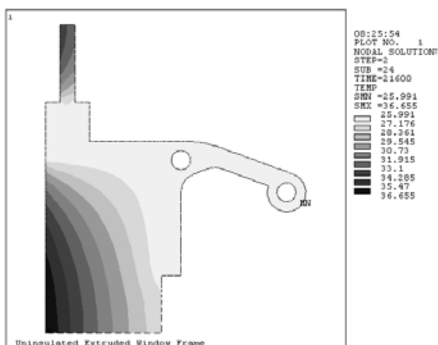


图 7-1 一个典型的 POST1 等值线图

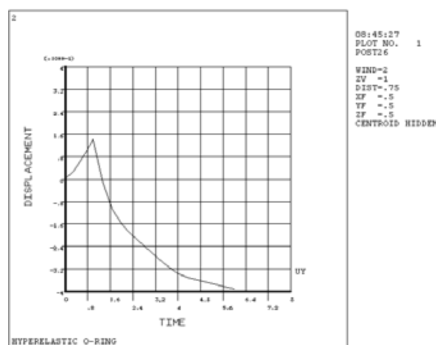


图 7-2 一个典型的 POST26 图

ANSYS 的后处理器仅是用于检查分析结果的工具。仍然需要使用你的工程判断能力来分析解释结果。例如：一等值线显示可能表明：模型的最高应力为 37800Pa，必须由你确定这一应力水平对你的设计是否允许。

7.1.2 结果文件

在求解中，ANSYS 运算器将分析的结果写入结果文件中，结果文件的名称取决于分

析类型：

（1）Jobname.RST：结果分析。

（2）Jobname.RTH：热力分析。

（3）Jobname.EMG：电磁场分析。

（4）Jobname.RFL：FLOTRAN 分析。

对于 FLOTRAN 分析，文件的扩展名为.RFL；对于其他流体分析，文件扩展名为.RST 或.RTH，取决于是否给出结构自由度。对不同的分析使用不同的文件标识有助于在耦合场分析中使用一个分析的结果作为另一个分析的载荷。

7.1.3 后处理可用的数据类型

求解阶段计算两种类型结果数据：

（1）基本数据包含每个节点计算自由度解：结构分析的位移、热力分析的温度、磁场分析的磁势等（见表 7-1）。这些被称为节点解数据。

（2）派生数据为由基本数据计算得到的数据：如结构分析中的应力和应变，热力分析中的热梯度和热流量，磁场分析中的磁通量等。派生数据又称为单元数据，它通常出现在单元节点、单元积分点以及单元质心等位置。

表 7-1 不同分析的基本数据和派生数据

学　科	基本数据	派生数据
结果分析	位移	应力、应变、反作用力
热力分析	温度	热流量、热梯度等
磁场分析	磁势	磁通量、磁流密度等
电场分析	标量电势	电场、电流密度等
流体分析	速度、压力	压力梯度、热流量等

7.2 通用后处理器（POST1）

使用 POST1 通用后处理器可观察整个模型或模型的一部分在某一个时间（或频率）上针对特定载荷组合时的结果。POST1 有许多功能，包括从简单的图像显示到针对更为复杂数据操作的列表，如载荷工况的组合。

要进入 ANSYS 通用后处理器，输入/POST1 命令或 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc。

7.2.1 将数据结果读入数据库

POST1 中第一步是将数据从结果文件读入数据库。要这样做，数据库中首先要有模

型数据（节点，单元等）。若数据库中没有模型数据，输入“RESUME”命令（或 GUI 菜单路径：Utility Menu > File > Resume Jobname.db）读入数据文件“Jobname.db”。数据库包含的模型数据应该与计算模型相同，包括单元类型、节点、单元、单元实常数、材料特性和节点坐标系。

数据库中被选来进行计算的节点和单元应属同一组，否则会出现数据不匹配。

一旦模型数据存在数据库中，输入 SET，SUBSET 和 APPEND 命令均可从结果文件中读入结果数据。

1．读入结果数据

输入“SET”命令（Main Menu > General PostProc > Read Results），可在一特定的载荷条件下将整个模型的结果数据从结果文件中读入数据库，覆盖掉数据库中以前存在的数据。边界条件信息（约束和集中力）也被读入，但这仅在存在单元节点载荷和反作用力的情况下。详情请见“OUTERS”命令。若不存在边界条件信息，则不列出或显示边界条件。加载条件靠载荷步和子步或靠时间（或频率）来识别。命令或路径方式指定的变元可以识别读入数据库的数据。

例如：SET,2,5 读入结果，表示将载荷步为 2，子步为 5。同理，SET,,,,,3.89 表示时间为 3.89 时的结果（或频率为 3.89，取决于所进行的分析类型）。若指定了尚无结果的时刻，程序将使用线性插值计算出该时刻的结果。

结果文件（Jobname.RST）中默认的最大子步数为 1000，超出该界限时，需要输入 SET,Lstep，LAST 引入第 1000 个载荷步，使用“/CONFIG”命令增加界限。

对于非线性分析，在时间点间进行插值常常会降低精度。因此，要使解答可用，务必在可求时间值处进行后处理。

对于 SET 命令有一些便捷标号：

- SET，FIRST 读入第一子步，等价的 GUI 方式为 First Set。
- SET，NEXT 读入第二子步，等价的 GUI 方式为 NextSet。
- SET，LAST 读入最后一子步，等价的 GUI 方式为 LastSet。
- SET 命令中的 NSET 字段（等价的 GUI 方式为 SetNumber）可恢复对应于特定数据组号的数据，而不是载荷步号和子步号。当有载荷步和子步号相同的多组结果数据时，这对 FLOTRAN 的结果非常有用。因此，可用其特定的数据组号来恢复 FLOTRAN 的计算结果。
- SET 命令的 LIST（或 GUI 中的 List Results）选项列出了其对应的载荷步和子步数，可在接下来的 SET 命令的 NSET 字段输入该数据组号，以申请处理正确的一组结果。
- SET 命令中的 ANGLE 字段规定了谐调元的周边位置（结构分析—PLANE25，PLANE83 和 SHELL61；温度场分析—PLANE75 和 PLANE78）。

2．其他恢复数据的选项

其他 GUI 菜单路径和命令也可以恢复结果数据。

（1）定义待恢复的数据。POST1 处理器中命令 INRES（Main Menu > General

Postproc > Data & File Opts）与 PREP7 和 SOLUTION 处理器中的 OUTRES 命令是姐妹命令，OUTRES 命令控制写入数据库和结果文件的数据，而 INRES 命令定义要从结果文件中恢复的数据类型，通过命令 SET，SUBSET 和 APPEND 等命令写入数据库。尽管不需对数据进行后处理，但 INRES 命令限制了恢复写入数据库的数据量。因此，对数据进行后处理也许占用的时间更少。

（2）读入所选择的结果信息。为了只将所选模型部分的一组数据从结果文件读入数据库，可用 SUBSET 命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > By characteristic）。结果文件中未用 INRES 命令指定恢复的数据，将以零值列出。

SUBSET 命令与 SET 命令大致相同，除了差别在于 SUBSET 只恢复所选模型部分的数据。用 SUBSET 命令可方便地看到模型的一部分的结果数据。例如：若只对表层的结果感兴趣，可以轻易地选择外部节点和单元，然后用 SUBSET 命令恢复所选部分的结果数据。

（3）向数据库追加数据。每次使用 SET，SUBSET 命令或等价的 GUI 方式时，ANSYS 就会在数据库中写入一组新数据并覆盖当前的数据。APPEND 命令（Main Menu > General Postproc > By characteristic）从结果文件中读入数据组并将与数据库中已有的数据合并（这只针对所选的模型而言）。当已有的数据库非零（或全部被重写时），允许将被查询的结果数据并入数据库。

可用 SET，SUBSET，APPEND 命令中的任一命令从结果文件将数据读入数据库。命令方式之间或路径方式之间的唯一区别是所要恢复的数据的数量及类型。追加数据时，务必不要造成数据不匹配。例：请看下一组命令：

```
/POST1
INRES,NSOL                    ！节点 DOF 求解的标志数据
NSEL,S,NODE,,l,5              ！选节点 1 至 5
SUBSET,1                      ！从载荷步 1 开始将数据写入数据库
！此时载荷步 1 内节点 1 到 5 的数据就存在于数据库中了
NSEL,S,NODE,,6,10             ！选节点 6 至 10
APPEND,2                      ！将载荷步 2 的数据并入数据库中
NSEL,S,NODE,,1,10             ！选节点 1 至 10
PRNSOL,DOF                    ！打印节点 DOF 求解结果
```

数据库当前就包含有载荷步 1 和载荷步 2 的数据。这样数据就不匹配。使用 PRNSOL 命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution）时，程序将从第二个载荷步中取出数据，而实际上数据是从现存于数据库中的两个不同的载荷步中取得的。程序列出的是与最近一次存入的载荷步相对应的数据。当然，若希望将不同载荷步的结果进行对比，将数据加入数据库中是很有用的。但若有目的地混合数据，要极其注意跟踪追加数据的来源。

在求解曾用不同单元组计算过的模型子集时，为避免出现数据不匹配，按下列方法进行。

● 不要重选解答在后处理中未被选择的单元。

● 从 ANSYS 数据库中删除以前的解答，可从求解中间退出 ANSYS 或在求解中间存储数据库。

若想清空数据库中所有以前的数据，使用下列任一方式：

GUI：Main Menu > General PostProc > Load Case > Zero Load Case。

命令：LCZERO。

上述两种方法均会将数据库中所有以前的数据置零，因而可重新进行数据存储。若在向数据库追加数据之前将数据库置零，其结果与使用 SUBSET 命令或等价的 GUI 路径也是一样的（该处假如 SUBSET 和 APPEND 命令中的变元一致）。

SET 命令可用的全部选项，对 SUBST 命令和 APPEND 命令完全可用。

默认情况下，SET，SUBSET 和 APPEND 命令将寻找这些文件中的一个：Jobname.RST，Jobname.RTH，Jobname.RMG，Jobname.RFL。在使用 SET，SLIBSET 和 APPEND 命令之前用 FILE 命令可指定其他文件名（GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > Data &File Opts）。

3．创建单元表

ANSYS 程序中单元表有两个功能：第一，它是在结果数据中进行数学运算的工具。第二，它能够访问其他方法无法直接访问的单元结果。例如：从结构一维单元派生的数据（尽管 SET，SUBSET 和 APPEND 命令将所有申请的结果项读入数据库中，但并非所有的数据均可直接用 PRNSOL 命令和 PLESON 等命令访问）。

将单元表作为扩展表，每行代表一单元，每列则代表单元的特定数据项。例如：一列可能包含单元的平均应力 SX，而另一列则代表单元的体积，第三列则包含各单元质心的 Y 坐标。

使用下列任一命令创建或删除单元表：

GUI：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table or Erase Table。

命令：ETABLE。

（1）填上按名字来识别变量的单元表。为识别单元表的每列，在 GUI 方式下使用 Lab 字段或在 ETABLE 命令中使用 Lab 变元给每列分配一个标识，该标识将作为以后所有的包括该变量的 POST1 命令的识别器。进入列中的数据靠 Item 名和 Comp 名以及 ETABLE 命令中的其他两个变元来识别。例如：对上面提及的 SX 应力，SX 是标识，S 将是 Item 变元，X 将是 Comp 变元。

有些项，如单元的体积，不需 Comp 变元。这种情况下，Item 为 VOLU，而 Comp 为空白。按 Item 和 Comp（必要时）识别数据项的方法称为填写单元表的“元件名”法。对于大多数单元类型而言，使用“元件名”法访问数据通常是那些单元节点的结果数据。

ETABLE 命令的文档通常列出了所有的 Item 和 Comp 的组合情况。要清楚何种组合有效，见 ANSYS 单元参考手册中每种单元描述中的“单元输出定义”。

表 7-2 是一个关于 BEAM4 的列表示例，可在表中“名称”列中的冒号后面使用任意名字，通过“元件名”法填写单元表。冒号前面的名字部分应输入作为 ETABLE 命令的 Item 变元，冒号后的部分（如果有的话）应输入作为 ETABLE 命令的 Comp 变元，O

列与 R 列表示在 Jobname.OUT 文件（O）中或结果文件（R）中该项是否可用："Y"表示该项总可用，数字（比如 1，2）则表示有条件的可用（具体条件详见表后注释），而"-"则表示该项不可用。

表 7-2 三维 BEAM4 单元输出定义

名　称	定　义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	单元节点号	Y	Y
MAT	单元的材料号	Y	Y
VOLU：	单元体积	-	Y
CENT：X，Y，Z	单元质心在整体坐标中的位置	-	Y
TEMP	积分点处的温度 T1，T2，T3，T4，T5，T6，T7，T8	Y	Y
PRES	节点（1，J）处的压力 P1，OFFST1，P2，OFFST2，P3，OFFST3，I 处的压力 P4，J 处的压力 P5	Y	Y
SDIR	轴向应力	1	1
SBYT	梁单元+Y 侧弯曲应力	1	1
SBYB	梁上单元-Y 侧弯曲应力	1	1
SBZT	梁上单元+Z 侧弯曲应力	1	1
SBZB	梁上单元-Z 侧弯曲应力	1	1
SMAX	最大应力（正应力+弯曲应力）	1	1
SMIN	最小应力（正应力-弯曲应力）	1	1
EPELDIR	端部轴向弹性应变	1	1
EPTHDIR	端部轴向热应变	1	1
EPINAXL	单元初始轴向应变	1	1
MFOR：（X，Y，Z）	单元坐标系 X，Y，Z 方向的力	2	Y
MMOM：（X，Y，Z）	单元坐标系 X，Y，Z 方向的力矩	2	Y

若单元表项目经单元 I 节点、中间节点、及 J 节点重复进行；

若 KEYOPT（6）＝1。

（2）填充按序号识别变量的单元表。可对每个单元加上不平均的或非单值载荷，将其填入单元表中。该数据类型包括积分点的数据、从结构一维单元（如杆，梁，管单元等）和接触单元派生的数据、从一维温度单元派生的数据、从层状单元中派生的数据等。这些数据将列在"单元对于 ETABLE 和 ESOL 命令的项目和序号"表中，而 ANSYS 帮助文件中，对于每一单元类型都有详细的描述。表 7-3 是 BEAM4 单元的示例。

表中的数据分成项目组（如：LS,LEPEL,SMISC 等），项目组中每一项都有用于识别的序列号（表 7-3 中 E，I，J 对应的数字）。将项目组（如：LS,LEPEL,SMISC 等）作为 ETABLE 命令的 Item 变元，将序列号（如：1，2，3 等）作为 Comp 变元，将数据填入单元表中，称之为填写单元表的"序列号"法。

例如：BEAM4 单元的 J 点处的最大应力为 Item=NMISC 及 Comp=3。而单元（E）的初始轴向应变（EPINAXL）为 Item=LEPYH，Comp=11。

表 7-3 梁单元关于 ETABLE 和 ESOL 命令的项目和序号

KEYOPT（9） = 0				
名　称	项　目	E	I	J
SDIR	LS	-	1	6
SBYT	LS	-	2	7
SBYB	LS	-	3	8
SBZT	LS	-	4	9
SBZB	LS	-	5	10
EPELDIR	LEPEL	-	1	6
SMAX	NMISC	-	1	3
SMIN	NMISC	-	2	4
EPTHDIR	LEPTH	-	1	6
EPTHBYT	LEPTH	-	2	7
EPTHBYB	LEPTH	-	3	8
EPTHBZT	LEPTH	-	4	9
EPTHBZB	LEPTH	-	5	10
EPINAXL	LEPTH	11	-	-
MFORX	SMISC	-	1	7
MMOMX	SMISC	-	4	10
MMOMY	SMISC	-	5	11
MMOMZ	SMISC	-	6	12
P1	SMISC	-	13	14
OFFST1	SMISC	-	15	16
P2	SMISC	-	17	18
OFFST 2	SMISC	-	19	20
P3	SMISC	-	21	22
OFFST32	SMISC	-	23	24

对于某些一维单元，如 BEAM4 单元，KEYOPT 设置控制了计算数据的量，这些设置可能改变单元表项目对应的序号，因此针对不同的 KEYOPT 设置，存在不同的“单元项目和序号表格”。表 7-4 和表 7-3 一样显示了关于 BEAM4 的相同信息，但列出的为 KEYOPT（9）＝3 时的序号（3 个中间计算点），而表 7-3 列出的是对应于 KEYOPT（9）＝3 时的序号。

例如：当 KEYOPT（9）＝0 时，单元 J 端 Y 向的力矩（MMOMY）在表 7-3 中是序号 11（SMISC 项），而当 KEYOPT（9）＝3 时，其序号（表 7-4）为 29。

表 7-4 ETABLE 命令和 ESOL 命令的 BEAM4 的项目名和序号

KEYOPT（9） = 3							
标号	项目	E	I	IL1	IL2	IL3	J
SDIR	LS	-	1	6	11	16	21
SBYT	LS	-	2	7	12	17	22
SBYB	LS	-	3	8	13	18	23
SBZT	LS	-	4	9	14	19	24
SBZB	LS	-	5	10	15	20	25
EPELDIR	LEPEL	-	1	6	11	16	21
EPELBYT	LEPEL	-	2	7	12	17	22
EPELBYB	LEPEL	-	3	8	13	18	23
EPELBZT	LEPEL	-	4	9	14	19	24
EPELBZB	LEPEL	-	5	10	15	20	25
EPINAXL	LEPTH	26	-	-	-	-	-
SMAX	NMISC	-	1	3	5	7	9
SMIN	NMISC	-	2	4	6	8	10
EPTHDIR	LEPTH	-	1	6	11	16	21
MFORX	SMISC	-	1	7	13	19	25
MMOMX	SMISC	-	4	10	16	22	28
MMOMY	SMISC	-	5	11	17	23	29
P1	SMISC	-	31	-	-	-	32
OFFST1	SMISC	-	33	-	-	-	34
P2	SMISC	-	35	-	-	-	36
OFFST2	SMISC	-	37	-	-	-	38
P3	SMISC	-	39	-	-	-	40
OFFST3	SMISC	-	41	-	-	-	42

（3）定义单元表的注释。

- ETABLE 命令仅对选择的单元起作用，即只将所选单元的数据送入单元表中，在 ETABLE 命令中改变所选单元，可以有选择地填写单元表的行。
- 相同序号的组合表示对不同单元类型有不同数据。例如：组合 SMISC，1 对梁单元表示 MFOR（X）（单元 X 向的力），对 SOLID45 单元表示 P1（面 1 上的压力），对 CONTACT48 单元表示 FNTOT（总的法向力）。因此，若模型中有几种单元类型的组合，务必要在使用 ETABLE 命令前选择一种类型的单元（用 ESEL 命令或 GUI 菜单路径：Utility Menu > Select > Entities）。
- ANSYS 程序在读入不同组的结果（例如对不同的载荷步）或在修改数据库中的结果（例如在组合载荷工况），不能自动刷新单元表，例如：假定模型由提供的

样本单元组成，在 POST1 中发出下列命令：

```
SET,1                    !读入载荷步 1 结果
ETABLE,ABC,1S,6          !在以 ABC 开头的列下将 J 端 KEYOPT（9）=0 的 SDIR
!移入单元表中
SET,2                    !读入载荷步 2 中结果
```

此时，单元表“ABC”列下仍含有载荷步 1 的数据。用载荷步 2 中的数据更新该列数据时，应用命令“ETABLE，KEFL”或通过 GUI 方式指定更新项。

- 可将单元表当作一“工作表”，对结果数据进行计算。
- 使用 POST1 中的“SAVE，FNAME，EXT”命令或者“／EXIT，ALL”命令，那么在退出 ANSYS 程序时，可以对单元表进行存盘（若使用 GUI 方式，选择 Utility Menu > File > Save as 或 Utility > File > Exit 后按照对话框内的提示进行）。这样可将单元表及其余数据存到数据库文件中。
- 为从内存中删除整个单元表，用“ETABLE，ERASE”命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > Element Table > Erase Table），或用“ETABLE，LAB，ERASE”命令删去单元表中的 Lab 列。用 RESET 命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > Reset）可自动删除 ANSYS 数据库中的单元表。

4．对主应力的专门研究

在 POST1 中，SHELL61 单元的主应力不能直接得到，默认情况下，可得到其他单元的主应力，除以下两种情况之外：

（1）在 SET 命令中要求进行时间插值或定义了某一角度。

（2）执行了载荷工况操作。

在上述任意一种情况下，必须用 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > Load Case > Line Elem Stress 或执行“LCOPER，LPRIN”命令以计算主应力。然后通过 ETABLE 命令或用其他适当的打印或绘图命令访问该数据。

5．读入 FLOTRAN 的计算结果

使用命令“FLREAD”（GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > Read Results > FLOTRAN2.1A）可以将结果从 FLOTRAN 的剩余文件读入数据库。FLOTRAN 的计算结果（Jobname.RFL）可以用普通的后处理函数或命令（例如：SET 命令，相应的 GUI 路径：Utility Menu > List > Results > Load Step Summary）读入。

6．数据库复位

“RESET”命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > General Postproc > Reset）可在不脱离 POST1 情况下初始化 POST1 命令的数据库默认部分，该命令在离开或重新进入 ANSYS 程序时的效果相同。

7.2.2 列表显示结果

将结果存档的有效方法（例如：报告、呈文等）是在 PosT1 中制表。列表选项对节点、单元、反作用力等求解数据可用。

下面给出一个样表（对应于命令“PRESOL,ELEM”）：

```
PRINT ELEM ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT
 ***** POST1 ELEMENT SOLUTION LISTING *****
LOAD STEP       1   SUBSTEP=       1
TIME=      1.0000           LOAD CASE=    0
EL=   1   NODES=   1    3       MAT=   1
BEAM3
TEMP =      0.00      0.00      0.00      0.00
LOCATION    SDIR            SBYT            SBYB
1 （I）            0.00000E+00   130.00                  -130.00
2 （J）      0.00000E+00   104.00              -104.00
LOCATION    SMAX            SMIN
1 （I）      130.00                  -130.00
2 （J）            104.00                  -104.00
LOCATION   EPELDIR       EPELBYT       EPELBYB
1 （I）      0.000000          0.000004          -0.000004
2 （J）            0.000000          0.000003          -0.000003
LOCATION   EPTHDIR       EPTHBYT       EPTHBYB
1 （I）          0.000000         0.000000         0.000000
2 （J）          0.000000         0.000000         0.000000
EPINAXL =      0.000000
EL=        2   NODES=       3       4   MAT=   1
BEAM3
TEMP =      0.00      0.00      0.00      0.00
LOCATION    SDIR            SBYT            SBYB
1 （I）          0.00000E+00     104.00          -104.00
2 （J）          0.00000E+00     78.000          -78.000
LOCATION    SMAX            SMIN
1 （I）           104.00           -104.00
2 （J）           78.000           -78.000
LOCATION   EPELDIR       EPELBYT       EPELBYB
1 （I）          0.000000         0.000003        -0.000003
2 （J）          0.000000         0.000003        -0.000003
LOCATION   EPTHDIR       EPTHBYT       EPTHBYB
1 （I）          0.000000         0.000000         0.000000
2 （J）          0.000000         0.000000         0.000000
EPINAXL =      0.000000
```

1．列出节点、单元求解数据

用下列方式可以列出指定的节点求解数据（原始解及派生解）：

命令：PRNSOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution。

用下列方式可以列出所选单元的指定结果：

命令：PRNSEL。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。

要获得一维单元的求解输出，在 PRNSOL 命令中指定 ELEM 选项，程序将列出所选单元的所有可行的单元结果。

下面给出一个样表（对应于命令“PRNSOL，S”）：

```
PRINT S     NODAL SOLUTION PER NODE
***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
LOAD STEP=      5   SUBSTEP=      2
TIME=     1.0000       LOAD CASE=    0
THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES
 NODE     SX          SY          SZ          SXY          SYZ          SXZ
    1   148.01     -294.54    .00000E+00  -56.256      .00000E+00  .00000E+00
    2   144.89     -294.83    .00000E+00   56.841      .00000E+00  .00000E+00
    3   241.84      73.743    .00000E+00  -46.365      .00000E+00  .00000E+00
    4   401.98     -18.212    .00000E+00  -34.299      .00000E+00  .00000E+00
    5   468.15     -27.171    .00000E+00  .48669E-01   .00000E+00  .00000E+00
    6   401.46     -18.183    .00000E+00   34.393      .00000E+00  .00000E+00
    7   239.90      73.614    .00000E+00   46.704      .00000E+00  .00000E+00
    8   -84.741    -39.533    .00000E+00   39.089      .00000E+00  .00000E+00
    9   3.2868     -227.26    .00000E+00   68.563      .00000E+00  .00000E+00
   10  -33.232     -99.614    .00000E+00   59.686      .00000E+00  .00000E+00
   11  -520.81     -251.12    .00000E+00  .65232E-01   .00000E+00  .00000E+00
   12  -160.58     -11.236    .00000E+00   40.463      .00000E+00  .00000E+00
   13  -378.55      55.443    .00000E+00   57.741      .00000E+00  .00000E+00
   14  -85.022     -39.635    .00000E+00 -39.143      .00000E+00  .00000E+00
   15  -378.87      55.460    .00000E+00 -57.637      .00000E+00  .00000E+00
   16  -160.91     -11.141    .00000E+00 -40.452      .00000E+00  .00000E+00
   17  -33.188     -99.790    .00000E+00 -59.722      .00000E+00  .00000E+00
   18   3.1090     -227.24    .00000E+00 -68.279      .00000E+00  .00000E+00
   19   41.811      51.777    .00000E+00 -66.760      .00000E+00  .00000E+00
   20  -81.004      9.3348    .00000E+00 -63.803      .00000E+00  .00000E+00
   21   117.64     -5.8500    .00000E+00 -56.351      .00000E+00  .00000E+00
   22  -128.21      30.986    .00000E+00 -68.019      .00000E+00  .00000E+00
   23   154.69     -73.136    .00000E+00  .71142E-01   .00000E+00  .00000E+00
   24  -127.64     -185.11    .00000E+00  .79422E-01   .00000E+00  .00000E+00
   25   117.22     -5.7904    .00000E+00   56.517      .00000E+00  .00000E+00
   26  -128.20      31.023    .00000E+00   68.191      .00000E+00  .00000E+00
   27   41.558      51.533    .00000E+00   66.997      .00000E+00  .00000E+00
   28  -80.975      9.1077    .00000E+00   63.877      .00000E+00  .00000E+00
MINIMUM VALUES
NODE         11          2           1          18            1           1
VALUE     -520.81     -294.83    .00000E+00  -68.279      .00000E+00  .00000E+00
MAXIMUM VALUES
NODE          5          3           1           9            1           1
```

```
VALUE    468.15    73.743    .00000E+00  68.563    .00000E+00  .00000E
```

2．列出反作用载荷及作用载荷

在 POST1 中有几个选项用于列出反作用载荷（反作用力）及作用载荷（外力）。PRRSOL 命令（GUI：Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu）列出了所选节点的反作用力。命令“FORCE”可以指定哪一种反作用载荷（包括：合力、静力、阻尼力或惯性力）数据被列出。“PRNLD”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List > Nodal Loads）列出所选节点处的合力，值为零的除外。

列出反作用载荷及作用载荷是检查平衡的一种好方法。也就是说，在给定方向上所加的作用力应总等于该方向上的反力（若检查结果跟预想的不一样，那么就应该检查加载情况，看加载是否恰当）。

耦合自由度和约束方程通常会造成载荷不平衡，但是，由命令 CPINTF 生成的耦合自由度（组）和由命令 CEINTF 或命令 CERIG 生成的约束方程几乎在所有情况下都能保持实际的平衡。

如前所述，如果对给定位移约束的自由度建立了约束方程，那么该自由度的反力不包括过该约束方程的外力，所以最好不要对给定位移约束的自由度建立约束方程。同样，对属于某个约束方程的节点，其节点力的合力也不应该包含该处的反力。在批处理求解中（用 OUTPR 命令请求），可得到约束方程反力的单独列表，但这些反力不能在 POST1 中进行访问。对大多数适当的约束方程，X、Y、Z 方向的合力应为零，但合力矩可能不为零，因为合力矩本身必须包含力的作用效果。

可能出现载荷不平衡的其他情况有：

- 四节点壳单元，其 4 个节点不是位于同一平面内。
- 有弹性基础的单元。
- 发散的非线性求解。

另外几个常用的命令是“FSUM”，“NFORCE”和“SPOINT”，下面分别说明。

FSUM 对所选的节点进行力、力矩求和运算和列表显示。

命令：FSUM。

GUI：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Total Force Sum。

下面给出一个关于命令 FSUM 的输出样本：

```
*** NOTE ***
Summations based on final geometry and will not agree with solution reactions.
***** SUMMATION OF TOTAL FORCES AND MOMENTS IN GLOBAL COORDINATES
*****
FX=    .1147202
FY=    .7857315
FZ=    .0000000E+00
MX=    .0000000E+00
MY=    .0000000E+00
MZ=    39.82639
SUMMATION POINT=   .00000E+00   .00000E+00   .00000E+00
```

NFORCE 命令除了总体求和外，还对每一个所选的节点进行力、力矩求和。

命令：NFORCE

GUI：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Sum @ Each Node。

下面给出一个关于命令 NFORCE 的输出样本：

```
***** POST1 NODAL TOTAL FORCE SUMMATION *****
LOAD STEP=    3  SUBSTEP=    43
THE FOLLOWING X,Y,Z FORCES ARE IN GLOBAL COORDINATES
NODE        FX            FY           FZ
   1   -.4281E-01     .4212        .0000E+00
   2    .3624E-03     .2349E-01   .0000E+00
   3    .6695E-01     .2116        .0000E+00
   4    .4522E-01     .3308E-01   .0000E+00
   5    .2705E-01     .4722E-01   .0000E+00
   6    .1458E-01     .2880E-01   .0000E+00
   7    .5507E-02     .2660E-01   .0000E+00
   8   -.2080E-02     .1055E-01   .0000E+00
   9   -.5551E-03    -.7278E-02   .0000E+00
  10    .4906E-03    -.9516E-02   .0000E+00
*** NOTE ***
Summations based on final geometry and will not agree with solution reactions.
***** SUMMATION OF TOTAL FORCES AND MOMENTS IN GLOBAL COORDINATES
*****
FX=   .1147202
FY=   .7857315
FZ=   .0000000E+00
MX=    .0000000E+00
  MY=    .0000000E+00
  MZ=    39.82639
  SUMMATION POINT=   .00000E+00   .00000E+00   .00000E+00
```

SPOINT 命令定义在哪些点（除原点外）求力矩和。

GUI：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Summation Pt > At Node。

GUI：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Summation Pt > At XYZ Loc。

3．列出单元表数据

用下列命令可列出存储在单元表中的指定数据：

命令：PRETAB。

GUI：Main Menu > General Postproc > Element Table > List Elem Table。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Elem Table Data。

为列出单元表中每一列的和，可用命令 SSUM（GUI：Main Menu > General Postproc > Element Table > Sum of Each Item）。

下面给出一个关于命令“PRETAB”和“SSUM”输出示例：

```
***** POST1 单元数据列表 *****
```

```
STAT     CURRENT      CURRENT      CURRENT
ELEM   SBYTI      SBYBI         MFORYI
   1    .95478E-10 -.95478E-10    -2500.0
   2   -3750.0        3750.0       -2500.0
   3   -7500.0        7500.0       -2500.0
   4   -11250.        11250.       -2500.0
   5   -15000.        15000.       -2500.0
   6   -18750.        18750.       -2500.0
   7   -22500.        22500.       -2500.0
   8   -26250.        26250.       -2500.0
   9   -30000.        30000.       -2500.0
  10   -33750.        33750.       -2500.0
  11   -37500.        37500.        2500.0
  12   -33750.        33750.        2500.0
  13   -30000.        30000.        2500.0
  14   -26250.        26250.        2500.0
  15   -22500.        22500.        2500.0
  16   -18750.        18750.        2500.0
  17   -15000.        15000.        2500.0
  18   -11250.        11250.        2500.0
  19   -7500.0        7500.0        2500.0
  20   -3750.0        3750.0        2500.0
MINIMUM VALUES
ELEM          11             1             8
VALUE     -37500.      -.95478E-10     -2500.0
MAXIMUM VALUES
ELEM           1            11            11
VALUE      .95478E-10     37500.         2500.0
SUM ALL THE ACTIVE ENTRIES IN THE ELEMENT TABLE
TABLE LABEL        TOTAL
SBYTI              -375000.
SBYBI               375000.
MFORYI             .552063E-09
```

4．其他列表

用下列命令可列出其他类型的结果：

（1）“PREVECT”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Vector Data）：列出所有被选单元指定的矢量大小及其方向余弦。

（2）“PRPATH”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Path Items）：计算然后列出在模型中沿预先定义的几何路径的数据。注意：必须事先定义一路径并将数据映射到该路径上。

（3）“PRSECT”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Linearized Strs）计算然后列出沿预定的路径线性变化的应力。

（4）“PRERR”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Percent

Error）列出所选单元的能量级的百分比误差。

（5）“PRITER”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Iteration Summry）列出迭代次数概要数据。

5．对单元、节点排序

默认情况下，所有列表通常按节点号或单元号的升序来进行排序。可根据指定的结果项先对节点、单元进行排序来改变它。“NSORT”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Nodes）基于指定的节点求解项进行节点排序，ESORT 命令（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elems）基于单元表内存入的指定项进行单元排序。例如：

```
NSEL,…                          !选节点
NSORT,S,X                       !基于 SX 进行节点排序
PRNSOL,S,COMP                   !列出排序后的应力分量
```

下面给出执行命令“NSORT”及“PRNSOL,S”之后的列表示例：

```
PRINT S      NODAL SOLUTION PER NODE
***** POST1 NODAL STRESS LISTING *****
LOAD STEP=       3   SUBSTEP=      43
TIME=      6.0000         LOAD CASE=     0
THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES
NODE      SX           SY           SZ           SXY           SYZ           SXZ
   111  -.90547      -1.0339      -.96928      -.51186E-01  .00000E+00  .00000E+00
    81  -.93657      -1.1249      -1.0256      -.19898E-01  .00000E+00  .00000E+00
    51  -1.0147      -.97795      -.98530       .17839E-01  .00000E+00  .00000E+00
    41  -1.0379      -1.0677      -1.0418      -.50042E-01  .00000E+00  .00000E+00
    31  -1.0406      -.99430      -1.0110       .10425E-01  .00000E+00  .00000E+00
    11  -1.0604      -.97167      -1.0093      -.46465E-03  .00000E+00  .00000E+00
    71  -1.0613      -.95595      -1.0017       .93113E-02  .00000E+00  .00000E+00
    21  -1.0652      -.98799      -1.0267       .31703E-01  .00000E+00  .00000E+00
    61  -1.0829      -.94972      -1.0170       .22630E-03  .00000E+00  .00000E+00
   101  -1.0898      -.86700      -1.0009      -.25154E-01  .00000E+00  .00000E+00
     1  -1.1450      -1.0258      -1.0741       .69372E-01  .00000E+00  .00000E+00
MINIMUM VALUES
NODE          1           81            1           111          111          111
VALUE    -1.1450      -1.1249      -1.0741      -.51186E-01  .00000E+00  .00000E+00
MAXIMUM VALUES
NODE        111          101          111             1          111          111
VALUE    -.90547      -.86700      -.96928       .69372E-01  .00000E+00  .00000E+00
```

使用下述命令恢复到原来的节点或单元顺序

命令：NUSORT。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Unsort Nodes。

命令：EUSORT。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Unsort Elems。

6．用户化列表

有些场合，需要根据要求来定制结果列表。“/STITLE”命令（无对应的 GUI 方式）可定义多达 4 个子标题，与主标题一起在输出列表中显示。输出用户可用的其他命令为：“/FORMAT”，“/HEADER”，和“/PAGA”（同样无对应的 GUI 方式）。

这些命令控制下述事情：重要数字的编号；列表顶部的表头输出；打印页中的行数等。这些控制仅适用于“PRRSOL”，“PRNSOL”，“PRESOL”，“PRETAB”，“PRPATH”命令。

7.2.3 图像显示结果

一旦所需结果存入数据库，可通过图像显示和表格方式观察。另外，可映射沿某一路径的结果数据。图像显示可能是观察结果的最有效方法。POST1 可显示下列类型图像：

（1）梯度线显示。

（2）变形后的形状显示。

（3）矢量图显示。

（4）路径绘图。

（5）反作用力显示。

（6）粒子流轨迹。

1．梯度线显示

梯度线显示表现了结果项（如应力、温度、磁场磁通密度等）在模型上的变化。梯度线显示中有 4 个可用命令：

命令：PLNSOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu。

命令：PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Element Solu。

命令：PLETAB。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Elem Table。

命令：PLLS。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Line Elem Res。

PLNSOL 命令生成连续的过整个模型的梯度线。该命令或 GUI 方式可用于原始解或派生解。对典型的单元间不连续的派生解，在节点处进行平均，以便可显示连续的梯度线。下面将举出原始解（TEMP）（如图 7-3 所示）和派生解（TGX）（如图 7-4 所示）梯度显示的示例。

```
PLNSOL,TEMP                    ！原始解：自由度 TEMP
```

若有 PowerGraphics（性能能优化的增强型 RISC 体系图形），可用下面任一命令来对派生数据求平均值。

命令：AVRES。

GUI：Main Menu > General Postproc > Options for Outp。

GUI：Utility Menu > List > Results > Options。

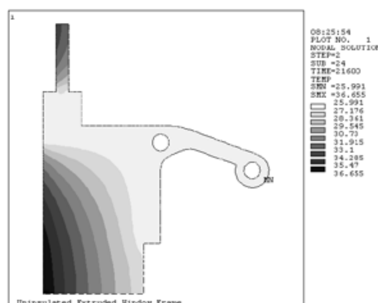


图 7-3 使用 PLNSOL 得到的原始解的梯度线

上述任一命令均可确定在材料及（或）实常数不连续的单元边界上是否对结果进行平均。

若“PowerGraphics”无效（对大多数单元类型而言，这是默认值），不能用“AVRES”命令去控制平均计算。平均算法则不管连接单元的节点属性如何，均会在所选单元上的所有节点处进行平均操作。这对材料和几何形状不连续处是不合适的。当对派生数据进行梯度线显示时（这些数据在节点处已做过平均），务必选择相同材料、相同厚度（对板单元），相同坐标系等的单元。

```
PLNSOL,TG,X                              !派生数据：温度梯度函数 TGX
```

“PLESOL”命令在单元边界上生成不连续的梯度线（如图 7-5 所示），该命令用于派生的解数据。命令流示例如下：

```
PLESOL，TG，X
```

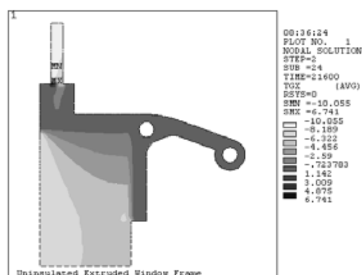


图 7-4 PLNSOL 命令对派生数据进行梯度显示

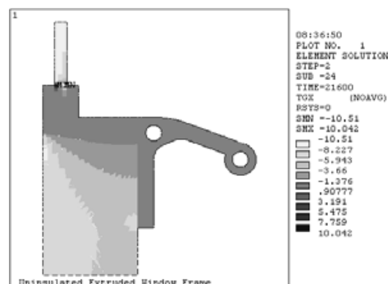


图 7-5 显示不连续梯度线的 PLESOL 图样

“PLETAB”命令可以显示单元表中数据的梯度线图（也可称云纹图或者云图）。在“PLETAB”命令中的“AVGLAB”字段，提供了是否对节点处数据进行平均的选择项（默认状态下：对连续梯度线作平均，对不连续梯度线不作平均）。下例假设采用 SHELL99 单元（层状壳）模型，分别对结果进行平均和不平均，如图 7-6 和图 7-7 所示，相应的命令流如下：

```
ETABLE,SHEARXZ,SMISC,9              !在第二层底部存在层内剪切 （ILSXZ）
```

```
PLETAB,SHEARXZ,AVG             !SHEARXZ 的平均梯度线图
PLETAB,SHEARXZ,NOAVG           !SHEARXZ 的未平均（默认值）的梯度线
```

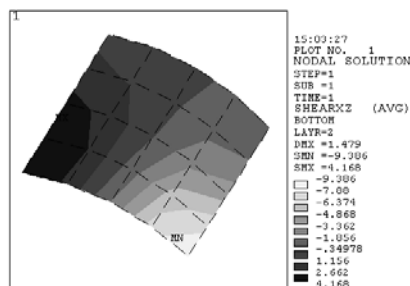


图 7-6 平均的 PLETAB 梯度线

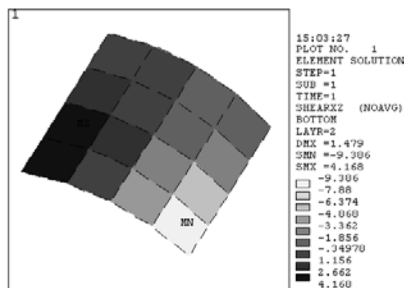


图 7-7 未平均的 PLETAB 梯度线

“PLLS”命令用梯度线的形式显示一维单元的结果，该命令也要求数据存储在单元表中，该命令常用于梁分析中显示剪力图和力矩图。下面给出一个梁模型（BEAM3 单元，KEYOPT（9）＝1）的示例，结果显示如图 7-8 所示，命令流如下：

```
ETABLE,IMOMENT,SMISC,6       !I 端的弯矩，命名为 IMOMENT
ETABLE,JMOMENT,SMISC,18      !J 端的弯矩，命名为 JMOMENT
PLLS,IMOMENT,JMOMENT         !显示 IMOMENT，JMOMENT 结果
```

“PLLS”命令将线性显示单元的结果，即：用直线将单元 I 节点和 J 节点的结果数值连起来，而不管结果沿单元长度是否是线性变化，另外，可用负的比例因子将图形倒过来。

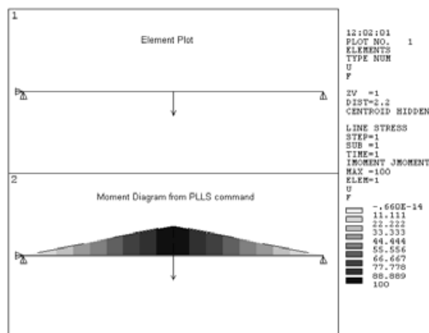


图 7-8 用 PLLS 命令显示的弯矩图

需要注意如下几个方面：

（1）可用/CTYPE 命令（GUI：Utility Menu > Plot Ctrls > Style > Contours > Contour Style）首先设置 KEY 为 1 来生成等轴侧的梯度线显示。

（2）平均主应力：默认情况下，各节点处的主应力根据平均分应力计算。也可反过来做，首先计算每个单元的主应力，然后在各节点处平均。其命令和 GUI 路径如下：

命令：AVPRIN。

GUI：Main Menu > General Postproc > Options for Outp。

GUI：Utility Menu > List > Results > Options。

该法不常用，但在特定情况下很有用。需注意的是，在不同材料的结合面处不应采

用平均算法。

（3）矢量求和：与主应力的做法相同。默认情况下，在每个节点处的矢量和的模（平方和的开方）是按平均后的分量来求的。用“AVPRIN”命令，可反过来计算，先计算每单元矢量和的模，然后在节点处进行平均。

（4）壳单元或分层壳单元：默认情况下，壳单元和分层壳单元得到的计算结果是单元上表面的结果。要显示上表面、中部或下表面的结果，用“SHELL”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Options for Outp）。对于分层单元，使用“LAYER”命令（GUI：Main Menu > General Posrproc > Options for Outp）指明需显示的层号。

（5）Von Mises 当量应力（EQV）：使用命令“AVPRIN”可以改变用来计算当量应力的有效泊松比。

命令：AVPRIN。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot-Nodal Solu。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot-Element Solu。

GUI：Utility Menu > Plot > Results > Contour Plot > Elem Solution。

典型情况下，对弹性当量应变（EPEL，EQV），可将有效泊松比设为输入泊松比，对非弹性应变（EPPL，EQV 或 EPCR，EQV），设为 0.5。对于整个当量应变（EPTOT，EQV），应在输入的泊松比和 0.5 之间选用一有效泊松比。另一种方法是，用命令 ETABLE 存储当量弹性应变，使有效泊松比等于输入泊松比，在另一张表中用 0.5 作为有效泊松比存储当量塑性应变，然后用“SADD”命令将两张表合并，得到整个当量应变。

2．变形后的形状显示

在结构分析中可用这些显示命令观察结构在施加载荷后的变形情况。其命令及相应的 GUI 路径如下：

命令：PLDISP。

GUI：Utitity Menu > Plot > Results > Deformed Shape。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

例如，输入如下命令，界面显示如图 7-9 所示。

```
PLDISP,1                !变形后的形状与原始形状叠加在一起
```

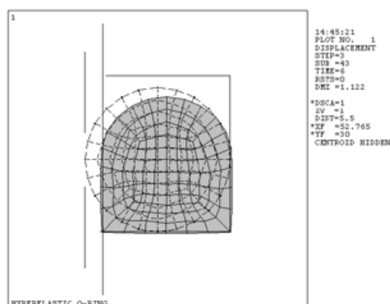


图 7-9 变形后的形状与原始形状一起显示

另外，可用命令“/DSCALE”来改变位移比例因子，对变形图进行缩小或放大显示。

需提醒的一点是，在用户进入POST1时，通常所有载荷符号被自动关闭，以后再次进入“PREP7”或“SOLUTION”处理器时仍不会见到这些载荷符号。若在POST1中打开所有载荷符号，那么将会在变形图上显示载荷。

3．矢量显示

矢量显示是指用箭头显示模型中某个矢量大小和方向的变化，通常所说的矢量包括：平移（U）、转动（ROT）、磁力矢量势（A）、磁通密度（B）、热通量（TF）、温度梯度（TG）、液流速度（V）、主应力（S）等。

用下列方法可产生矢量显示：

命令：PLVECT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined Or User-Defined。

可用下列方法改变矢量箭头长度比例：

命令：/VSCALE。

GUI：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Vector Arrow Scaling。

例如：输入下列命令，图形界面将显示如图7-10所示。

```
PLVECT,B                    !磁通密度（B）的矢量显示
```

说明：在“PLVECT”命令中定义两个或两个以上分量，可以生成自己所需的矢量值。

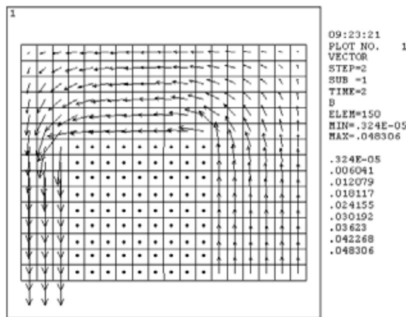


图7-10 磁场强度的PLVECT矢量图

4．路径图

路径图是显示某个变量（比如位移、应力，温度等）沿模型上指定路径的变化图。要产生路径图，执行下述步骤：

（1）执行命令“PATH”定义路径属性（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > Path Status > Defined Paths）。

（2）执行命令“PPATH”定义路径点（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path）。

（3）执行命令“PDEF”将所需的量映射到路径上（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Map Onto Path）。

（4）执行命令“PLPATH”和“PLPAGM”显示结果（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Plot Path Items）。

5．反作用力显示

用命令“/PBC”下的“RFOR”或“RMOM”来激活反作用力显示。以后的任何显示（由“NPLOT”，“EPLOT”或“PLDISP”命令生成）将在定义了 DOF 约束的点处显示反作用力。约束方程中某一自由度节点力之和不应包含过该节点的外力。

如反作用力一样，也可用命令“/PBC”（GUI：Utility Menu > PlotCtrls > Symbols）中的 NFOR 或 NMOM 项显示节点力，这是单元在其节点上施加的外力。每一节点处这些力之和通常为 0，约束点处或加载点除外。

默认情况下，打印出的或显示出的力（或力矩的）的数值代表合力（静力、阻尼力和惯性力的总和）。“FORCE”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Options For Outp）可将合力分解成各分力。

6．粒子流和带电粒子轨迹

粒子流轨迹是一种特殊的图像显示形式，用于描述流动流体中粒子的运动情况。带电粒子轨迹是显示带电子粒子在电、磁场中如何运动的图像。

粒子流或带电粒子轨迹显示常用的有以下两组命令及相应的 GUI 路径：

（1）“TRPOIN”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Defi Trace Pt）。在路径轨迹上定义一个点（起点、终点或者两点中间的任意一点）。

（2）“PLTRAC”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Plot Flow Tra）。在单元上显示流动轨迹，能同时定义和显示多达 50 点。

PLTRAC 图样如图 7-11 所示。

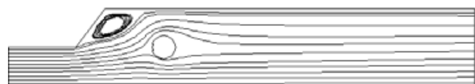


图 7-11 粒子流轨迹示例

PLTRAC 命令中的 Item 字段和 comp 字段能使用户看到某一特定项的变化情况（如：对于粒子流动而言，其轨迹为速度、压力和温度；对于带电粒子而言，其轨迹为电荷）。项目的变化情况沿路径用彩色的梯度线显示出来。

另外，与粒子流或带电粒子轨迹相关的还有如下命令：

- “TRPLIS”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > List Trace Pt）：列出轨迹点。
- “TRPDEL”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Dele Trace Pt）：删除轨迹点。
- “TRTIME”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Time Interval）：定以流动轨迹时间间隔。
- “ANFLOW”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Paticle

Flow）：生成粒子流的动画序列。

图像需要注意以下 3 个方面：

（1）粒子流轨迹偶尔会无明显原因地停止。在靠近管壁处的静止流体区域，或当粒子沿单元边界运动时，会出现这种情况。为解决这个问题，在流线交叉方向轻微调整粒子初始点。

（2）带电粒子轨迹，用“TRPON”命令（GUI：Main Menu > General Posproc > Plot Results > Defi Trace Pt）输入的变量 Chrg 和 Mass 在 MKS 单位制中具有相应的单位“库仑”和“千克”。

（3）粒子轨迹跟踪算法会导致死循环，例如某一带电粒子轨迹会导致无限循环。要避免出现死循环，可用“PLTRAC”命令的“MXLOOP”变元设置极限值。

7．破碎图

若在模型中有“SOLID65”单元，可用“PLCRACK”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Crack/Crash）确定那些单元已断裂或碎开。以小圆圈标出已断裂，以八边形表示混凝土已碎开（如图 7-12 所示）。在使用不隐藏矢量显示的模式下，可见断裂和压碎的符号，为指定这一设备，用命令“/DEVICE，VECTOR，ON”（GUI：Utility Menu > Plotctrls > Device Options）。

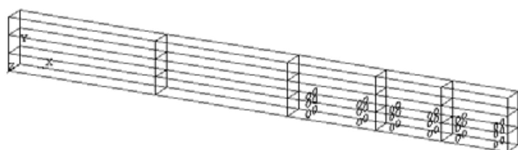


图 7-12 具有裂缝的混凝土梁

7.2.4 映射结果到某一路径上

POST1 后处理器的一个最实用的功能是将结果数据映射到模型的任意路径上。这样一来，就可沿该路径执行许多数学运算（比如微积分运算），从而得到有意义的计算结果，例如：开裂处的应力强度因子和 J-积分，通过该路径的热量、磁场力等。而另外一个好处是，能以图形或列表方式观察结果项沿路径的变化情况。

只能在包含实体单元（二维或三维）或板壳单元的模型中定义路径，一维单元不支持该功能。

通过路径观察结果包含以下 3 个步骤：

（1）定义路径属性（PATH 命令）。

（2）定义路径点（PPATH 命令）。

（3）沿路径插值（映射）结果数据（PDEF 命令）。

一旦进行了数据插值，可用图像显示（PLPATH 或 PLPAGM 命令）和列表方式观察，或执行算术运算，如：加、减、乘、除、积分等。PMAP 命令（在 PDEF 命令前发出该命令）中提供了处理材料不连续及精确计算的高级映射技术，详情可参考 ANSYS 在线

帮助文档。

另外，图像也可以将路径结果存入文档文件或数组参数中，以便调用，下面详细介绍利用路径观察结果的方法和步骤。

1．定义路径

要定义路径，首先要定义路径环境然后定义单个路径点。通过在工作平面上拾取节点、位置或填写特定坐标位置表来决定是否定义路径，然后通过拾取或使用下列命令、菜单路径中的任一种方式生成路径：

命令：PATH

PPATH

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > On Working Plane。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Location。

关于 PATH 命令有下列信息：

- 路径名（不多于 8 个字符）。
- 路径点数（2～1000）仅在批处理模式或用“By Location”选项定义路径点时需要；使用拾取时，路径点数等于拾取点数。
- 映射到该路径上的数据组数（最小为 4，默认值为 30，无最大值）。
- 路径上相临点的分段数（默认值为 20，无最大值）。
- 用“By Location”选项时，出现一个单独的对话框，用于定义路径点（PPATH 命令）， 输入路径点的整体坐标值，插值过的路径的几何形状依据激活的 CSYS 坐标系。另外，也可定义一坐标系用于几何插值（用 PPATH 命令中的 CS 变元）。

利用命令“PATH，STATUS”观察路径设置的状态。

PATH 和 PPATH 命令可以在激活的 CSYS 坐标系中定义路径的几何形状。若路径是直线或圆弧，只需两个端点（除非想高精度插值，那将需要更多的路径点或子分点）。必要时，图像可以在定义路径前，利用 CSCIR 命令（GUI：Utility Menu > Work plane > Local Coordinate Systems > Move Singularity）移动奇异坐标点。

要显示已定义的路径，需首先沿路径插值数据，然后输入命令“/PBC,PATH,,1”（GUI：Utility Menu > Plotctrls > Symbols），接着输入命令“EPLOT”或“NPLOT”（GUI：Utility Menu > Plot > Elements 或 Utility Menu > Plot > Nodes），ANSYS 将延路径用云纹图的形式显示结果数值。图 7-13 表示一条定义在柱坐标系中的路径。

2．使用多路径

一个模型中并不限制路径数目，但是一次只有一个路径为当前路径（即：只有一个路径是激活的），图像可以利用“PATH，NAME”命令改变当前激活的路径，在 PATH 命令中不用定义其他变元，已命名的路径将成为新的当前路径。

3．沿路径插值数据

用下列命令可达到该目的：

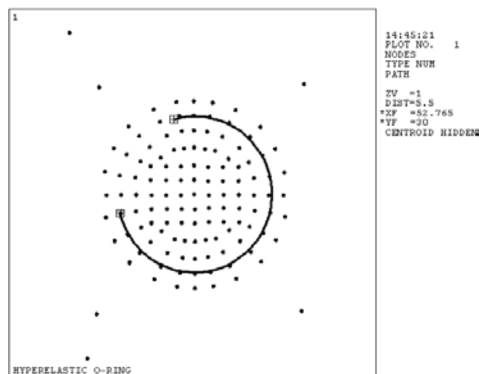


图 7-13 显示路径的节点图

命令：PDEF。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Map onto Path。

命令：PVECT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Unit Vector。

这些命令要求路径被预先定义好。

用 PDEF 命令，可在激活的结果坐标系中沿着路径插值任何结果数据：原始数据（节点自由度解）、派生数据（应力、通量、梯度等）、单元表数据、FLOTRAN 节点结果数据等。本次讨论的余下部分（及在其他文档中）将插值项称为路径项。

例如：沿着 X 路径方向插值热通量，命令如下：

```
PDEF,XFLUX,TF,X
```

XFLUX 值是图像定义的分配给路径项的任意名字，TF 和 X 放在一起识别该项为 X 方向的热通量。

图像可以利用下列命令，使结果坐标系与激活的坐标系（用于定义路径）相配。

```
*GET,ACTSYS,ACTIVE,CSYS
RSYS,ACTSYS
```

第一条命令创建了一个用户定义参数（ACTSYS），该参数表征了定义当前激活的坐标系的值。第二条命令则设置结果坐标系到由 ACTSYS 指定的坐标系上。

4．映射路径数据

POST1 用{nDiv（nPts-1） + 1}个插值点将数据映射到路径上，这里 nPts 是路径上的点数，nDiv 是在点间的子分数（或者说分段数）[EPATH]。创建第一条路径项时，程序自动插值下列几项：XG，YG，ZG 和 S，前 3 个是插值点的 3 个整体坐标值，S 是距起始节点的路径长度。在用路径项执行数学运算时这些项是有用的。例如：S 可用于计算线积分。若要在材料不连续处精确映射数据，可在 PMAP 命令中使用 DISCON=MAT 选项（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > Path Options）。

为从路径上删除路径项（除 XG，YG，ZG 和 S），用“PDEF，CLEAR”命令。而命令 PCALC（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Operations）则可

以从一个路径存储路径项、定义一平行路径及计算两路径间路径项之差。

PVECT 命令可以定义沿路径的法矢量、切矢量或正向矢量。如果要使用该命令，需激活笛卡尔坐标系。下面给出一个 PVECT 命令的应用实例－－定义在每个插值点处与路径相切的单位矢量：

```
PVECT,TANG,TXX,TTY,TTZ。
```

TTX，TTY 和 TTZ 是用户定义的分配给矢量的 X，Y，Z 分量的名字。在数学上的 J 积分、点积和叉积等运算中可使用这些矢量。为精确映射法矢量和切矢量，在“PMAP”命令中使用“ACCURATE”选项，在映射数据之前用命令“PMAP”。

5．观察路径项

要得到指定路径项与路径距离的关系图，使用下述方法之一：

命令：PLPATH。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Plot Path Items。

要得到指定路径项的列表，使用下述方法之一：

命令：PRPATH。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Path Items。

可为命令“PLPATH”、“PRPATH”或“PRANGE”控制路径距离范围（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Path Range）。在路径显示的横坐标项中路径定义变量也能用来取代路径距离。

图像也可以用另外两个命令 PLSECT（GUI：Mian Menu > General Posproc > Path Operations > Linearized Strs）和 PRSECT（GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Linearized Strs）来计算和观察在“PPATH”命令中由最初两个节点定义的沿某一路径的线性应力，尤其在分析压力容器时，可用该命令将应力分解成几种应力分量：膜应力，剪应力和弯曲应力等。另外还需说明的一点是，路径必须在激活的显示坐标系中定义。

可用下列命令（GUI）沿路径用彩色梯度线显示数据项，从而路径上的数据项可以直观的清晰度量。

命令：PLPAGM。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Plot Path Items > On Geometry。

6．在路径项中执行算术运算

下列 3 个命令可用于在路径项中执行算术运算：

（1）“PCALC”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Operations）：对路径进行＋，×，/，求幂，微分，积分。

（2）“PDOT”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Dot Product）：计算两路径矢量的点积。

（3）“PCROSS”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Cross Product）：计算两路径矢量的叉积。

7．将路径数据从一文件中存档或恢复

若想在离开“POST1”时保留路径数据，必须将其存入文件或数组参数中，以便于以后恢复。首先可选一条或多条路径，然后将当前路径写入一文件中：

命令：PSEL。

GUI：Utility Menu > Select > Paths。

命令：PASAVE。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Store > Paths in file。

要从一个文件中取出路径信息及将该数据存为当前激活的路径数据，可用下列方法：

命令：PARESU。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Retrieve > Paths from file。

可选择仅存档或取出路径数据（用“PDEF”命令映射到路径上的数据）或路径点（用“PPATH”命令定义的点）。恢复路径数据时，它变为当前激活的路径数据（已存在的激活路径数据被取代）。若用命令“PHRESH”并有多路径时，列表中的第一条路径成为当前激活路径。

输入输出示例如下：

```
/post1
path,radial,2,30,35          !定义路径名，点号，组号，分组号
ppath,1,,.2                  !由位置来定义路径
ppath,2,,.6
pmap,,mat                    !在材料不连续处进行映射数据
pdef,sx,s,x                  !描述径向应力
pdef,sz,s,z                  !描述周向应力
plpath,sx,sz                 !绘应力图
pasave                       !在文件中存储所定义的路径
finish
/post1
paresu                       !从文件中恢复路径数据
plpagm,sx,,node              !绘制路径上径向应力
finish
```

8．将路径数据存档或从数组参数中恢复

若想把粒子流或带电粒子轨迹映射到某一路径（用“PLTRAC”命令）上，将路径数据写入数组是有用的，若想把路径数据保存在一数组参数内，用下列命令或等价的 GUI 方式：

命令：PAGET，PARRAY，POPT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Retrieve > Path Points。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Retrieve > Path Data。

要从一数组变量中恢复路径信息并将数据存储为当前激活的路径数据，用下列方式：

命令：PAPUT，PARRAY，POPT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Store > Path Points。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Archive Path > Store > Path Data。

可选择仅存档或取出路径数据（用“PDEF”命令映射到路径上的数据）或路径点（用PPATH 命令定义）。PAGET 命令和 PAPUT 命令中 POPT 变元的设置决定了存储或恢复什么数据，图像必须在恢复路径数据和标识前恢复路径点（详情可参考 ANSYS 在线帮助文档）。恢复路径数据时，它会变成当前激活的路径数据（已存在的路径数据被取代）。输入输出示例如下，对应的屏幕输出如图 7-14 和图 7-15 所示。

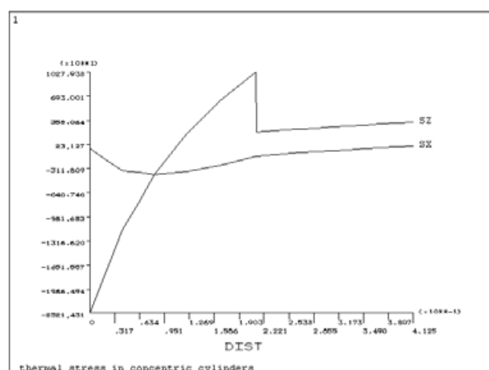


图 7-14 不同材料结合面处显示应力不连续的 PLPATH 示例

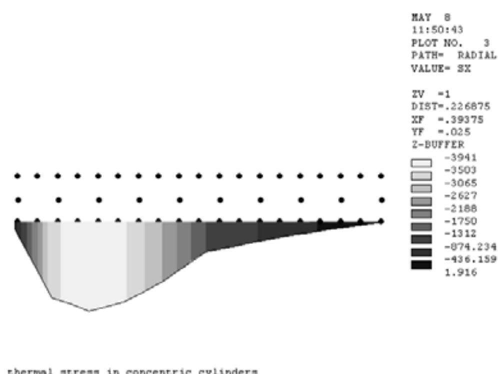


图 7-15 PLPAGM 显示的例子

```
/post1
path,radial,2,30,35               !定义路径名，点号，组号，分组号
ppath,1,,.2                       !按位置定义路径
ppath,2,,.6
pmap,,mat                         !在材料不连续处进行映射数据
pdef,sx,s,x                       !描述径向应力
```

```
pdef,sz,s,z                       !描述周向应力
plpath,sx,sz                      !绘应力图
paget,radpts,points               !将路径点存档于 radpts 数组中
paget,raddat,table                !将路径数据存档于 raddat 数组中
paget,radlab,label                !将路径标识存档于 radlab 数组中
finish
/post1
*get,npts,parm,radpts,dim,x       !从 radpts 数组中取出点号
*get,ndat,parm,raddat,dim,x       !从 raddat 数组中取出路径数据点号
*get,nset,parm,radlab,dim,x       !从 radlab 数组中取出数据标识号
ndiv=（ndat-1）/（npts-1）        !计算子分数
path,radial,npts,ns1,ndiv         !用组号 nsl > nset 生成路径 radial
paput,radpts,points               !取出路径点
paput,raddat,table                !取出路径数据
paput,radlab,labels               !取出路径列表
plpagm,sx,,node                   !绘制路径上径向图
finish
```

9．删除路径

删除一个或多个路径时，用下列方式之一：

命令：PADELE，DELOPT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Delete Path。

GUI：Main Menu > General Postproc > Elec&Mag Calc > Delete Path。

可按名字选择删除所有路径或某一路径，用“PATH，STATUS”命令可浏览当前路径名列表。

7.2.5 表面操作

在通用后处理 POST1 中，图像可以映射节点结果数据到用户定义的表面上，然后可以对表面结果进行数学运算而获得如下这些有意义的量：集中力、横截面的平均应力、流体速率、通过任意截面的热流等。图像同样可以画出这些映射结果的轮廓线。

图像可以通过 GUI 方式或命令流方式进行表面操作，如表 7-5 所示为表面操作的命令，相应的 GUI 菜单路径为：Main Menu > General Postproc > Surface Operations area。

只有在包含 3D 实体单元的模型中，图像才能定义表面。壳体、梁和 2D 单元类型均不支持该功能。

表面操作的具体步骤如下：

（1）通过执行“SUCR”命令定义表面。

（2）通过执行“SUSEL”和“SUMAP”命令映射结果数据到选择的表面。

（3）通过执行“SUEVAL”，“SUCALC”和“SUVECT”命令处理结果。

一旦映射数据到表面，图像就可以通过执行命令“SUPL”或“SUPR”图形显示或列表显示结果数据。

表 7-5 表面操作命令列表

命令	用途
SUCALC	通过操作指定表面上的两个存在结果数据库来创建新的结果数据
SUCR	创建一表面
SUDEL	删除几何信息一旦对指定的表面或选择表面映射结果
SUEVAL	对映射选项进行操作并以标准参数的形式存储结果
SUGET	移动表面并映射结果到一列参数
SUMAP	映射结果数据到表面
SUPL	图形显示映射的结果数据
SUPR	列表显示映射的结果数据
SURESU	从指定的文件中恢复表面定义
SUSAVE	保存定义的表面到一文件
SUSEL	选择一子表面
SUVECT	对两个结果矢量进行操作

1．定义表面

通过执行“SUCR”命令可以定义表面，表面名称不超过 8 个字符，表面一般有两种类型：

（1）基于当前工作平面的横截面。

（2）在当前工作平面坐标系下，图像指定半径的封闭球面。

对于 SurfType = CPLANE，nRefine 指出了定义表面的点的数量。如果 SurfType = CPLANE，并且 nRefine = 0，那么，这些点在截断单元的截面之中。当提高 nRefine 到 1 时，每个表面将被分成 4 个子面，而加入结果的点数也同样地增加。nRefine 可以在 0 和 3 之间变化，当然提高 nRefine 对表面操作速度的影响是十分明显的。

说明：该处提到的“SurfType”和“nRefine”是表 7-5 中命令（比如 SUCR 等）的操作项，详情可查阅 ANSYS 帮助文档。

执行/EFACET 命令将增加这种细化，超过 1 的数值将增强 nRefine 的效果。/EFACET 命令可以把单元划分为几个子单元，而 nRefine 则定义了子单元的小平面。

对于 SurfType = SPHERE，nRefine 指出了沿球面某个角度（最小 10°，最大 90°，默认值为 90°）弧长的等分数。

一旦图像定义了“表面”，ANSYS 将会自动计算以下几个预定义的几何量并保存：

（1）GCX，GCY，GCZ ：表面上每个点的全局笛卡尔坐标。

（2）NORMX，NORMY，NORMZ：表面上每个点的单位法向矢量的分量。

（3）DA：每个点的共享面积（即：表面总面积÷表面节点总数）。

这些量都是用来进行表面数据的数学运算（例如，DA 就是用来进行表面积分）。一旦图像建立了表面，这些量就可以（通过使用预定义标签）为后续的数学运算所使用。

执行“SUPL，SurfName”命令可以显示用户定义的表面。一个模型中最多可以存在

100 个表面，而所有的操作（映射结果数据，数学运算等）将在所选择的表面上进行。图像可以通过 SUSEL 命令来改变选择的表面设置。

2．映射结果数据

一旦图像定义了表面，通过使用“SUMAP”命令可以映射结果数据到该表面。节点结果数据（在当前激活的结果坐标系中）加入到表面并作为结果可以执行各种图像操作。结果数据由原始数据（例如：节点自由度），派生数据（例如：应力，流量，梯度等），“FLOTRAN”节点解以及其他结果值构成。

当图像使用“SUMAP”命令映射数据时，要先给结果设置提供名称，并指定数据类型和特性。

通过执行以下命令，图像可以使结果坐标系符合当前激活的坐标系（通常用来定义路径）：

（1）*GET，ACTSYS，ACTIVE，，CSYS。

（2）RSYS，ACTSYS。

第一条命令创建了图像定义的一个参数（ACTSYS），这一参数拥有定义当前激活坐标系的值。第二条命令设置结果坐标系为用参数（ACTSYS）指定的坐标系。

执行“SUMAP,RSetname,CLEAR”命令可以清除选择表面的结果设置（除了 GCX，GCY，GCZ，NORMX，NORMY，NORMZ，DA），而使用“SUEVAL”，“SUVECT”或“SUCALC”命令可以操作表面的结果设置，从而形成附加的标签结果。

3．检查表面结果

通过使用“SUPL”命令，图像可以图形显示表面结果；而通过使用 SUPR 命令，图像可以列表显示表面结果。同样的，图像也能够通过使用特殊的结果设置获得矢量显示（例如，流体速度矢量显示）。例如，如果指定“SetName”为“vector prefix”，那么 ANSYS 程序将以箭头的方式显示这些矢量。

说明：上面所说的“SetName”是指命令“SUPR”和“SUPL”的操作变量，详情可以查阅 ANSYS 帮助文档。

矢量显示示例：

```
SUCREATE,SURFACE1,CPLANE          ! 创建名称为"SURFACE1"的一表面
SUMAP,VELX,V,X                    ! 映射 x,y,z 方向的速度
SUMAP,VELY,V,Y
SUMAP,VELZ,V,Z
SUPLOT,SURFACE1,VEL               ! 矢量显示速度
```

/EDGE 命令控制子平面的云图显示，跟后面处理图形显示的其他命令很相似。

4．对映射表面结果数据进行数学运算

对映射的表面结果数据可以进行 3 种数学运算：

（1）SUCALC 命令可以对所选择的表面进行加、乘、除、指数和三角函数运算。

（2）SUVECT 命令可以对所选择表面的矢量进行点积和差积运算。

（3）SUEVAL 命令可以对所选择的表面进行表面积分、平均和求和运算。

5．保存表面数据到一个文件

图像可以存储表面数据到文件，因此图像在下次重新进入“POST1”后处理器时，这些数据可以被恢复。“SUSAVE”命令用来保存数据，而“SURESU”命令则用来恢复数据。

当图像保存表面数据到文件时，可以只保存一个表面，也可以保存所有选择的表面，也可以保存所有定义的表面（包括未选择的表面）。当图像恢复表面数据时，保存的表面就成为当前激活的表面，而此前的激活表面则被自动清除。

保存表面到一个文件并恢复数据示例：

```
/post1
! 在工作平面坐标原点处定义半径 0.75 的球面，10 等分每个 90⁰弧长
sucreate,surf1,sphere,0.75,10
wpoff,,,-2                          ! 平移工作平面
!定义与工作平面相交的一平面并选择单元
sucreate,surf2,cplane

susel,s,surf1                       ! 选择表面 surf1
sumap,psurf1,pres                   ! 映射压力数据到 surf1，名称为"psurf1"
susel,all                           ! 选择所有的表面
sumap,velx,v,x                      ! 映射 VX 到所有的表面，名称为"velx"
sumap,vely,v,y                      ! 映射 VY 到所有的表面，名称为"vely"
sumap,velz,v,z                      ! 映射 VZ  到所有的表面，名称为"velz"

supr                                ! 当前表面数据的全局状态
supl,surf1,sxsurf1                  !云图显示 sxsurf1
supl,all,velx,1                     ! 云图显示 velx
supl,surf2,vel                      !矢量显示速度矢量

suvect, vdotn,vel,dot,normal        !   表面法向与速度矢量的点积
! 结果存储在"vdotn"
sueval, flowrate, INTG, vdotn       ! 面积积分"vdotn"  获得 apdl 参数"flow rate"
susave,all,file,surf                ! 保存数据
finish
```

6．以数组参数的形式保存表面数据

把表面结果写如数组参数之后，图像便可以对结果数据进行“APDL”操作。利用“SUGET”命令，图像可以把结果数据写入自定义的数组参数中，另外，还可把几何信息也同时写入。

7．删除表面

使用“SUDEL”命令可以删除一个或多个表面，而这些表面上映射的结果数据也同时被删除。图像可以选择删除所有的表面，也可以通过指定的表面名来有选择的删除单个或多个表面。使用“SUPR”命令可以列表检查当前的表面名。

7.2.6 将结果旋转到不同坐标系中显示

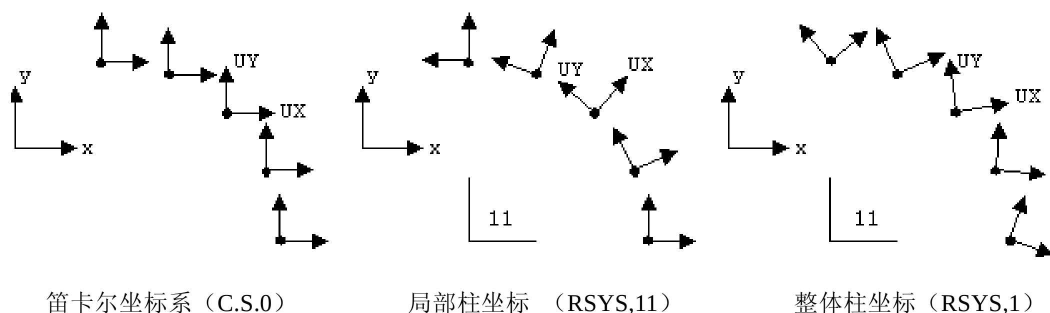
在求解计算中，计算结果数据包括位移（UX，UY，ROTX 等）、梯度（TGX，TGY 等）、应力（SX，SY，SZ 等）、应变（EPPLX，EPPLXY 等）等。这些数据以节点坐标系（基本数据或节点数据）或任意单元坐标系（派生数据或单元数据）的分量形式存入数据库和结果文件中。然而，结果数据通常需要转换到激活的结果坐标系（默认情况下为整体直角坐标系中）来显示、列表和单元表格数据存储操作，这正是本小节要介绍的内容。

使用“RSYS”命令（GUI：Main Menu > General Postproc > Options For Outp），可以将激活的结果坐标系转换成整体柱坐标系（RSYS，1），整体球坐标系（RSYS，2），任何存在的局部坐标系（RSYS，N，这里 N 是局部坐标系序号）或求解中所使用的节点坐标系和单元坐标系（RSYS，SOLU）。若对结果数据进行列表、显示或操作，首先将它们变换到结果坐标系。当然，也可将这些结果坐标系设置回整体坐标系（RSYS,0）。

图 7-16 显示在几种不同的坐标系设置下，位移是如何被输出的。位移通常是根据节点坐标系（一般总是笛卡尔坐标系）给出，但用“RSYS”命令可使这些节点坐标系变换为指定的坐标系。例如：RSYS，1 可使结果变换到与整体柱坐标系平行的坐标系，使 UX 代表径向位移，UY 代表切向位移。类似地，在磁场分析中 AX 和 AY，及在流场分析中 VX 和 VY 也用 RSYS，1 变换的整体柱坐标系径向、切向值输出。

某些单元结果数据总是以单元坐标系输出，而不论激活的结果坐标系为何种坐标系。这些仅用单元坐标系表述的结果项包括：力、力矩、应力、梁、管和杆单元的应变，及一些壳单元的分布力和分布力矩。

在多数情况下，例如：当在单个载荷或多载荷的线性叠加情况下，将结果数据变换到结果坐标系中并不影响最后结果值，然而，大多数模型叠加技术（PSD，CQC，SRSS 等）是在求解坐标系中进行，且涉及到开方运算。由于开方运算去掉了与数据相关的符号，叠加结果在被转换到结果坐标系后，可能会与所期望的值不同。在这些情况下，可用“RSYS,SOLU”命令来避免变换，使结果数据保持在求解坐标系中。



笛卡尔坐标系（C.S.0）　　局部柱坐标 （RSYS,11）　　整体柱坐标（RSYS,1）

图 7-16 用 RSYS 的结果变换

下面用圆柱壳模型来说明如何改变结果坐标系。在此模型中，图像可能会对切向应

力结果感兴趣，所以需转换结果坐标系，命令流如下：

```
PLNSOL,S,Y      !显示如图 7-17 所示，SY 是在整体笛卡尔坐标系中（默认值）
RSYS,1
PLNSOL,S,Y      !显示如图 7-18 所示，SY 是在整体柱坐标系中
```

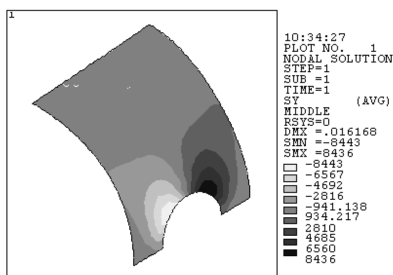


图 7-17　SY 在整体笛卡尔坐标系中

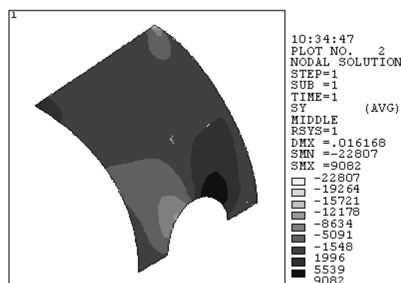


图 7-18　SY 在整体柱坐标系中

在大变形分析中（用命令“NLGEOM，ON”打开大变形选项，且单元支持大变形），单元坐标系首先按单元刚体转动量旋转，因此各应力、应变分量及其他派生出的单元数据包含有刚体旋转的效果。用于显示这些结果的坐标系是按刚体转动量旋转的特定结果坐标系。但 HYPER56、HYPER58、HYPER74、HYPER84、HYPER86 和 HYPER158 单元例外，这些单元总是在指定的结果坐标系中生成应力、应变，没有附加刚体转动。另外，在大变形分析中的原始解，例如：位移，是并不包括刚体转动效果的，因为节点坐标系不会按刚体转动量旋转。

7.3 时间历程后处理（POST26）

时间历程后处理器 POST26 可用于检查模型中指定点的分析结果与时间、频率等的函数关系。它有许多分析能力：从简单的图形显示和列表到诸如微分和响应频谱生成的复杂操作。POST26 的一个典型用途是在瞬态分析中以图形表示结果项与时间的关系或在非线性分析中以图形表示作用力与变形的关系。

使用下列方法之一进入 ANSYS 时间历程后处理器：

命令：POST26。

GUI：Main Menu > Time Hist Postpro。

7.3.1 定义和储存POST26 变量

POST26 的所有操作都是对变量而言的，是结果项与时间（或频率）的简表。结果项可以是节点处的位移、单元的热流量、节点处产生的力、单元的应力、单元的磁通量等。图像对每个 POST26 变量任意指定大于或等于 2 的参考号，参考号 1 用于时间（或频率）。因此，POST26 的第一步是定义所需的变量，第二步是存储变量，这些内容在下面描述。

1．定义变量

可以使用下列命令定义 POST26 变量。所有这些命令与下列 GUI 路径等价：

GUI：Main Menu > Time Hist Postproc > Define Variables。

GUI：Main Menu > Time Hist Postproc > Elec&Mag > Circuit > Define Variables。

- FORCE 命令指定节点力（合力、分力、阻尼力或惯性力）。
- SHELL 命令指定壳单元（分层壳）中的位置（TOP、MID、BOT），ESOL 命令将定义该位置的结果输出（节点应力、应变等）。
- LAYERP26L 指定结果待储存的分层壳单元的层号，然后，SHELL 命令对该指定层操作。
- NSOL 命令定义节点解数据（仅对自由度结果）。
- ESOI 命令定义单元解数据（派生的单元结果）。
- RFORCER 命令定义节点反作用数据。
- GAPF 命令用于定义简化的瞬态分析中间隙条件中的间隙力。
- SOLU 命令定义解的总体数据（如时间步长、平衡迭代数和收敛值）。

例如：下列命令定义两个 POST26 变量：

```
NSOL,2,358,U,X
ESOL,3,219,47,EPEL,X
```

变量 2 为节点 358 的 UX 位移（针对第一条命令），变量 3 为 219 单元的 47 节点的弹性约束的 X 分力（针对于第二条命令）。然后，对于这些结果项，系统将给它们分配参考号，如果用相同的参考号定义一个新的变量，则原有的变量将被替换。

2．存储变量

当定义了 POST26 变量和参数，就相当于在结果文件的相应数据建立了指针。存储变量就是将结果文件中的数据读入数据库。当发出显示命令或 POST26 数据操作命令（包括表 7-6 所列命令）或选择与这些命令等价的 GUI 路径时，程序自动存储数据。

表 7-6 存储变量的命令

命令	GUI 菜单路径
PLVAR	Main Menu > Time Hist Postproc > Graph Variables
PRVAR	Main Menu > Time Hist Postproc > List Variable
ADD	Main Menu > Time Hist Postproc > Math Operations > Add
DERIV	Main Menu > Time Hist Postproc > Math Operations > Derivate
QUOT	Main Menu > Time Hist Postproc > Math Operations > Divde
VGET	Main Menu > Time Hist Postproc > Table Operations > Variable to Par
VPUT	Main Menu > Time Hist Postproc > Table Operations > Parameter to Var

在某些场合，需要使用“STORE”命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postproc > Store Data）直接请求变量存储。这些情况将在下面的命令描述中解释。如果在发出“TIMERANGE”命令或“NSTORE”命令 （这两个命令等价的 GUI 路径为 Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > Data）之后使用“STORE”命令，那么默认情况为

“STORE，NEW”。由于“TIMERANGE”命令 和“NSTORE”命令为存储数据重新定义了时间或频率点或时间增量，因而需要改变命令的默认值。

可以使用下列命令操作存储数据：

- MERGE

将新定义的变量增加到先前的时间点变量中。即：更多的数据列被加入数据库。在某些变量已经存储（默认）后，如果希望定义和存储新变量，这是十分有用的。

- NEW

替代先前存储的变量，删除先前计算的变量，并存储新定义的变量及其当前的参数。

- APPEND

添加数据到先前定义的变量中。即：如果将每个变量看作一数据列，“APPEND”操作就为每一列增加行数。当要将两个文件（如瞬态分析中两个独立的结果文件）中相同变量集中在一起时，这是很有用的。使用“FILE”命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > File）指定结果文件名。

- ALLOC，N

为顺序存储操作分配 N 个点（N 行）空间，此时如果存在先前定义的变量，那么将被自动清零。由于程序会根据结果文件自动确定所需的点数，所以正常情况下不需用该选项。

使用“STORE”命令的一个实例如下：

```
/POST26
NSOL,2,23,U,Y              !变量 2=节点 23 处的 UY 值
SHELL,TOP                  !指定壳的顶面结果
ESOL,3,20,23,S,X           !变量 3=单元 20 的节点 23 的顶部 SX
PRVAR,2,3                  !存储并打印变量 2 和 3
SHELL,BOT                  !指定壳的底面为结果
ESOL,4,20,23,S,X           !变量 4=单元 20 的节点 23 的底部 SX
STORE                      !使用命令默认，将变量 4 和变量 2、3 置于内存
PLESOL,2,3,4               !打印变量 2，3，4
```

图像应该注意以下几个方面：

（1）默认情况下，可以定义的变量数为 10 个。使用命令 NUMVAR（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > File）可增加该限值（最大值为 200）。

（2）默认情况下，POST26 在结果文件寻找其中的一个文件。可使用 FILE 命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > File）指定不同的文件名（RST、RTH、RDSP 等）。

（3）默认情况下，力（或力矩）值表示合力（静态力、阻尼力和惯性力的合力）。FORCE 命令允许对各个分力操作。

壳单元和分层壳单元的结果数据假定为壳或层的顶面。SHELL 命令允许指定是顶面、中面或底面。对于分层单元可通过 LAYERP26 命令指定层号。

（4）定义变量的其他有用命令：

- NSTORE（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > Data），定义待存储的时间点或频率点的数量。
- TIMERANGE（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > Data），定义待读取数据的时间或频率范围。
- TVAR（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > Data），将变量 1（默认是表示时间）改变为表示累积迭代号。
- VARNAM（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Settings > Graph 或 Main Menu > Time Hist Postpro > List），给变量赋名称。
- RESET（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Reset Postproc），所有变量清零，并将所有参数重新设置为默认值。

（5）使用“FINISH”命令（GUI：Main Menu > Finish）退出 POST26，删除 POST26 变量和参数。如：“FILE”，“PRTIME”，“NPRINT”等，由于它们不是数据库的内容，故不能存储，但这些命令均存储在 LOG 文件中。

7.3.2 检查变量

一旦定义了变量，可通过图形或列表的方式检查这些变量。

1．产生图形输出

PLVAR 命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Graph Variables）可在一个图框中显示多达 9 个变量的图形。默认的横坐标（X 轴）为变量 1（静态或瞬态分析时表示时间，谐波分析时表示频率）。使用“XVAR”命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Setting > Graph）可指定不同的变量号（比如应力、变形等）作为横坐标。图 7-19 和图 7-20 所示是图形输出的两个实例。

如果横坐标不是时间，可显示三维图形（用时间或频率作为 Z 坐标），使用下列方法之一改变默认的 X—Y 视图：

命令：/VIEW。

GUI：Utility Menu > PlotCtrs > Pan,Zoom,Rotate。

GUI：Utility Menu > PlotCtrs > View Setting > Viewing Direction。

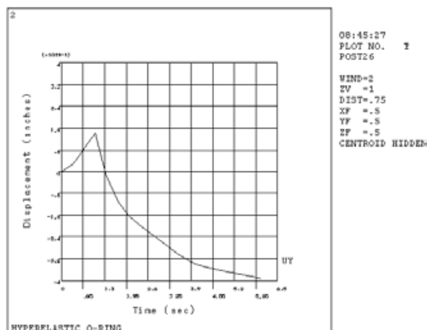


图 7-19 使用 XVAR＝1（时间）作为横坐标的 POST26 输出

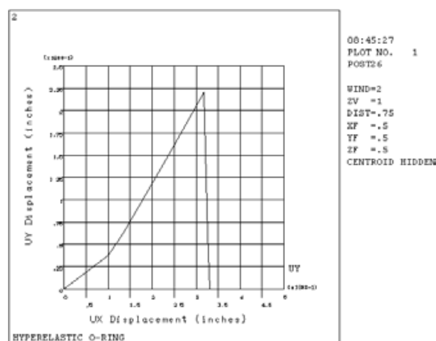


图 7-20 使用 XVAR＝0，1 指定不同的变量号作为横坐标是的 POST26 输出

在非线性静态分析或稳态热力分析中，子步为时间，也可采用这种图形显示。

当变量包含由实部和虚部组成的复数数据时，默认情况下，“PLVAR”命令显示的为幅值。使用“PLCPLX”命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > Setting > Graph）切换到显示相位、实部和虚部。

图形输出可使用许多图形格式参数。通过选择 GUI：Utility Menu > PlotCtrs > Style > Graphs 或下列命令实现该功能：

（1）激活背景网格（/GRID 命令）。

（2）曲线下面区域的填充颜色（/GROPT 命令）。

（3）限定 X、Y 轴的范围（/XRANGE 及/YRANGE 命令）。

（4）定义坐标轴标签（/AXLAB 命令）。

（5）使用多个 Y 轴的刻度比例（/GRTYP 命令）

2．计算结果列表

图像可以通过“PRVAR”命令（GUI：Main Menu > Time Hist Postpro > List Variables）在表格中列出多达 6 个变量，同时还可以获得某一时刻或频率处的结果项的值，也可以控制打印输出的时间或频率段。操作如下：

命令：NPRINT，PRTIME。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > List。

通过“LINES”命令（GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > List）可对列表输出的格式做微量调整。下面是“PRVAR”的一个输出示例：

```
***** ANSYS time-history VARIABLE LISTING *****
   TIME           51 UX          30 UY
                  UX             UY
 .10000E-09     .000000E+00    .000000E+00
 .32000         .106832        .371753E-01
 .42667         .146785        .620728E-01
 .74667         .263833        .144850
 .87333         .310339        .178505
 1.0000         .356938        .212601
 1.3493         .352122        .473230E-01
```

```
        1.6847           .349681         -.608717E-01
    time-history SUMMARY OF VARIABLE EXTREME VALUES
VARI TYPE   IDENTIFIERS   NAME    MINIMUM     AT TIME      MAXIMUM    AT TIME
    1 TIME       1 TIME      TIME     .1000E-09    .1000E-09    6.000       6.000
    2 NSOL     51 UX        UX       .0000E+00    .1000E-09    .3569       1.000
    3 NSOL     30 UY        UY       -.3701         6.000         .2126       1.000
```

对于由实部和虚部组成的复变量，“PRVAR”命令的默认列表是实部和虚部。可通过命令“PRCPLX”选择实部、虚部、幅值、相位中的任何一个。

另一个有用的列表命令是“EXTREM”（GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes），可用于打印设定的 X 和 Y 范围内 Y 变量的最大和最小值。也可通过命令*GET（GUI：Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data）将极限值指定给参数。下面是“EXTREM”命令的一个输出示例：

```
Time-History SUMMARY OF VARIABLE EXTREME VALUES
VARI TYPE   IDENTIFIERS   NAME    MINIMUM     AT TIME      MAXIMUM    AT TIME
    1 TIME      1 TIME      TIME     .1000E-09  .  1000E-09     6.000        6.000
    2 NSOL     50 UX        UX      .0000E+00  . 1000E-09  .   4170         6.000
    3 NSOL     30 UY        UY      -.3930        6.000         .2146        1.000
```

7.3.3 POST26 后处理器的其他功能

1．进行变量运算

POST26 可对原先定义的变量进行数学运算，下面给出两个应用实例。

实例（1）：在瞬态分析时定义了位移变量，可让该位移变量对时间求导，得到速度和加速度，命令流如下：

```
    NSOL,2,441,U,Y,UY441          !定义变量 2 为节点 441 的 UY，名称=UY441
    DERIV,3,2,1,,BEL441           !变量 3 为变量 2 对变量 1(时间)的一阶导数,名称为 BEL441
    DERIV,4,3,1,,ACCL441          !变量 4 为变量 3 对变量 1（时间）的一阶导数，名称为
ACCL441
```

实例（2）：将谐响应分析中的复变量（$a+ib$）分成实部和虚部，再计算它的幅值（$\sqrt{a^2+b^2}$）和相位角，命令流如下：

```
    REALVAR,3,2,,,REAL2           !变量 3 为变量 2 的实部，名称为 REAL2
    IMAGIN,4,2,,IMAG2             !变量 4 为变量 2 的虚部，名称为 IMAG2
    PROD,5,3,3                    !变量 5 为变量 3 的平方
    PROD,6,4,4                    !变量 6 为变量 4 的平方
    ADD,5,5,6                     !变量 5（重新使用）为变量 5 和变量 6 的和
    SQRT,6,5,,,AMPL2              !变量 6（重新使用）为幅值
    QUOT,5,3,4                    !变量 5（重新使用）为（b / a）
    ATAN,7,5,,,PHASE2             !变量 7 为相位角
```

可通过下列方法之一创建自己的 POST26 变量

- “FILLDATA”命令（GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Table Operations > Fill

Data）：用多项式函数将数据填入变量。

- “DATA”命令将数据从文件中读出。该命令无对应的 GUI，被读文件必须在第一行中含有“DATA”命令，第二行括号内是格式说明，数据从接下去的几行读取。然后通过/INPUT 命令（GUI：Urility Menu > File > Read lnput from）读入。

另一个创建 POST26 变量的方法是使用 VPUT 命令，它允许将数组参数移入一变量。逆操作命令为“VGET”，它将 POST26 变量移入数组参数。

2．产生响应谱

该方法允许在给定的时间历程中生成位移、速度、加速度响应谱，频谱分析中的响应谱可用于计算结构的整个响应。

POST26 的“RESP”命令用来产生响应谱：

命令：RESP。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Generate Spectrm。

RESP 命令需要先定义两个变量：一个含有响应谱的频率值（LFTAB 字段）；另一个含有位移的时间历程（LDTAB 字段）。LFTAB 的频率值不仅代表响应谱曲线的横坐标，而且也是用于产生响应谱的单自由度激励的频率。可通过“FILLDATA”或“DATA”命令产生“LFTAB”变量。

“LDTAB”中的位移时间历程值常产生于单自由度系统的瞬态动力学分析。通过“DATA”命令（位移时间历程在文件中时）和“NSOL”命令（GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables）创建“LDTAB”变量。系统采用数据时间积分法计算响应谱。

7.4 实例导航——导弹发动机药柱模型结果后处理

为了使读者对 ANSYS 的后处理操作有个比较清楚的认识和掌握，以下实例将对第 4 章的有限元计算结果进行后处理，以此分析药柱在温度和内压载荷作用下的受力情况，从而分析研究其危险部位。

7.4.1 通用后处理器

由于该问题共有 4 个载荷步，所以对应的分析结果也有多个，为了让读者对通用后处理器的使用有深刻的印象，本节只取第二个载荷步进行后处理分析，其他载荷步的分析结果的后处理分析类似。进入通用后处理器的 GUI 操作：Main Menu > General Postproc。

01 读入载荷步分析结果。

GUI 操作：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Load Step，弹出如图 7-21 所示的对话框，在“Load step number”中填入 2（第二个载荷步），单击“OK”按钮即将第二个载荷步的分析结果读入数据库中。

另外也可以用其他的方式读入载荷步分析结果，所用的 GUI 操作分别位于 Main

Menu > General Postproc > Read Results 中，如“First Set”表示读入第一个载荷步分析结果，“Next Set”表示读入当前载荷步的下一个载荷步分析结果等。“By Time/Freq”表示读入指定时间处的分析结果，比如第二个载荷步我们知道其结束时间为 0.2s，则如图 7-22 设置读入的分析结果是一样的。“By Pick”可以列出结果文件里的所有载荷步，选择指定的载荷步，如图 7-23 所示，单击“read”后，读入的也将是第二个载荷步的分析结果。

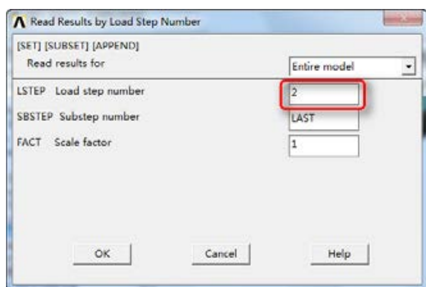


图 7-21 读入指定载荷步的设置

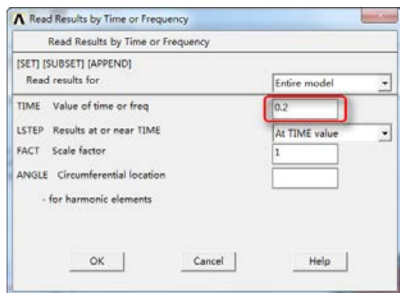


图 7-22 读入指定时间处的分析结果

02 绘制结构变形图。

GUI 操作：Utitity Menu > Plot Results > Deformed Shape，弹出如 7-24 所示的对话框，其中“Def shape only”表示只显示变形后的图形，“Def+undeformed”表示显示变形后和变形前的图形，“Def+undef edge”表示显示变形后和变形前的轮廓。在这里选择“Def+ undef edge”来对比受力前后的结构，单击“OK”按钮后变形图如图 7-25 所示。

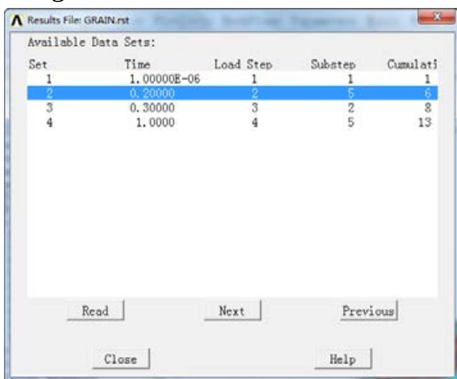


图 7-23 读入指定载荷步的分析结果

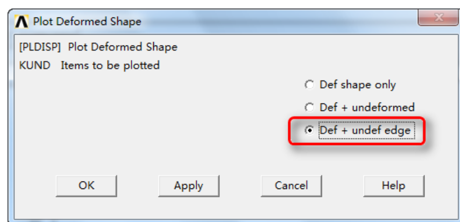


图 7-24 变形显示设置

03 设置变形比例放大因子。对于小变形分析，ANSYS 默认的是变形设置是放大后的变形状况，为了得到实际的变形，可以设置变形的比例放大因子，GUI 操作：Plot Ctrls > Style > Displacment Scaling，弹出如图 7-26 所示的对话框，默认的是“Auto calculated”，这里选择 1.0(true scale)表示真实的变形显示，如图 7-27 所示。

04 云图显示结果。为了更形象地显示整个分析结果，将结果放到柱坐标系显示，GUI 操作：Main Menu > General Postproc > Options For Outp，弹出如图 7-28 所示的对话框，将“Result coord system”设置成“Global cylindric”（柱坐标系）。

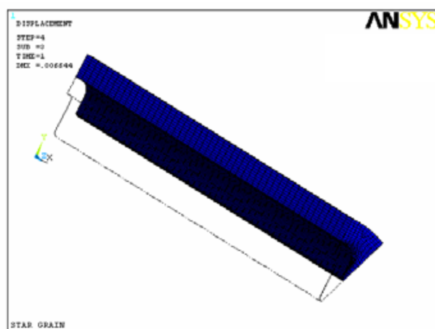


图 7-25 放大后的变形图

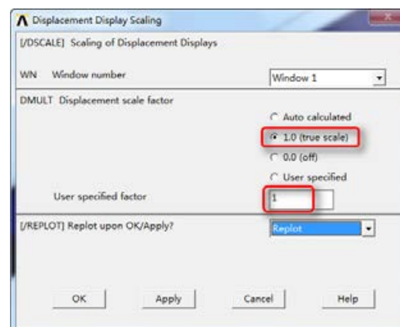


图 7-26 变形比例因子设定

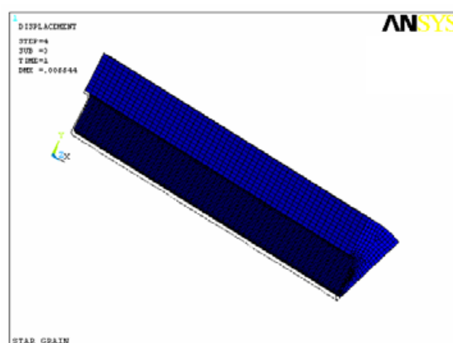


图 7-27 实际的变形图

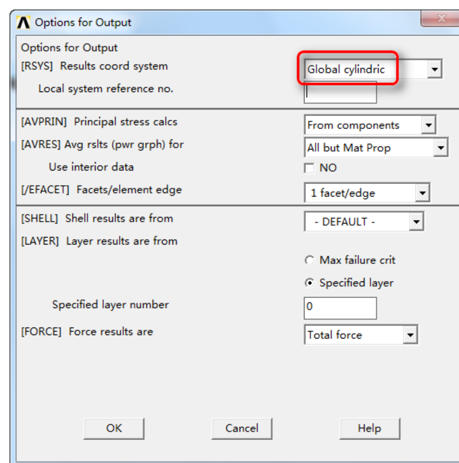


图 7-28 结果坐标系设置

节点解的云图显示 GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu，弹出如图 7-29 所示的对话框，选择 Nodal Solution > DOF Solution > Displacment 将显示结构总位移图（如图 7-30 所示），同理选择“Y-Component of displacement”可以显示 Y • 图（径向位移），如图 7-31 所示。另外值得一提的是在该对话框同样可以设置变形和变形放大比例因子，具体选项设置可参照前面。

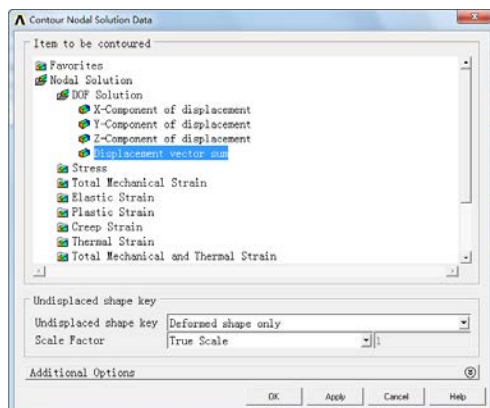


图 7-29 云图显示设置

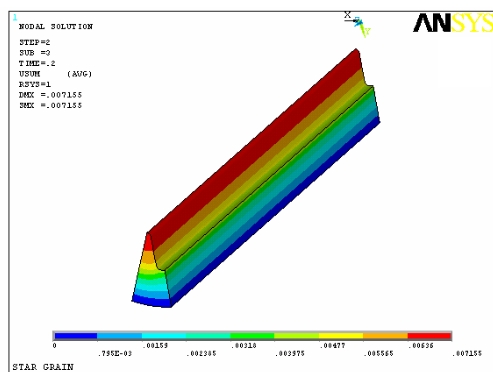


图 7-30 总位移变形云图

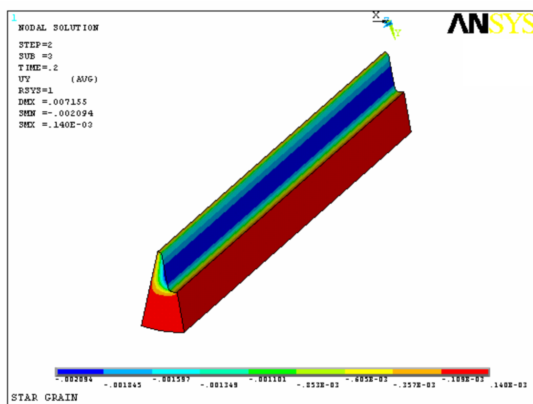


图 7-31 径向位移变形云图

05 云图显示设置。ANSYS 的默认显示效果在很多情况下并不能满足个性化的要求，为了得到适合的显示效果，需要对显示设置做一些基本的调整，一般可以对如下几方面进行相应地调整。

❶窗口设置。

GUI 操作：Plot Ctrls > Window Controls，其中可以进行相应的窗口显示设置，如“Window Options”，可以设置窗口中的内容显示，如图 7-32 设置后，显示窗口将只显示云图标签和文件名。

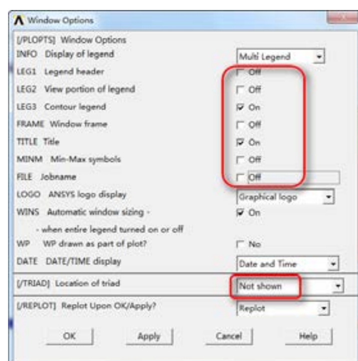


图 7-32 窗口显示设置

❷标签设置。

GUI 操作：Plot Ctrls > Style > Mutilegend Options > Coutour Legend，弹出如图 7-33 所示的对话框，可以具体设置标签的位置。



图 7-33 标签位置设置

❸云图设置。

GUI 操作：Plot Ctrls > Style > Coutour 中有许多关于云图的设置，图像可以方便地对云图的显示进行相关设置，具体可参照相关帮助文件。

由于该问题关心的是受力情况，所以将应力和应变云图显示出来，以便于具体分析结构的受力。“Stress”表示应力情况，“Strain”表示应变情况，分别选择“Von Mises Stress”和“Von Mises Strain”可以得到如图 7-34 和图 7-35 所示的应力应变云图。

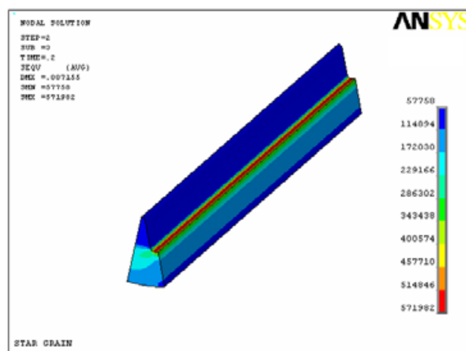


图 7-34 “Von Mises”应力云图

图 7-35　“Von Mises”应变云图

从图中可以看出，最大的“Von Mises”应力为 571982Pa，最大的“Von Mises”应变为 24.5%，且都发生在翼尖的过渡倒圆处，说明该地方是一个危险部位。我们也可以显示径向和环向的应力进行比较，分别选择“Stress”中的“X componets of stress”和“Y componets of stress”得到如图 7-36 和图 7-37 所示的云图。

图 7-36　径向应力云图

从图中可以看出，径向最大应力为-17MPa，环向最大应力为-17.5MPa，且都发生在翼尖处，数值为负说明该处受压，是因为在点火升压过程中药柱承受相当大的压应力。

```
云图显示的命令流格式：
/POST1
!读入载荷步 2
SET,2
!设置变形结果显示
PLDISP，2
!设置变形比例因子
/DSCALE,,1
!将结果坐标系设置为柱坐标系
RSYS,1
!云图显示结果
PLNSOL,U,SUM !总位移显示
PLNSOL,U,Y !径向位移显示
!云图显示设置
!****以下设置窗口显示
```

```
/PLOPTS,LEG1,0
/PLOPTS,LEG2,0
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,DATE,0
/TRIAD,OFF
!****以下设置标签显示
/UDOC,,CNTR,RIGHT
!****以下设置标签显示
PLNSOL,S,EQV      !von Mises 应力显示
PLNSOL,EPTO,EQV      !von Mises 应变显示
```

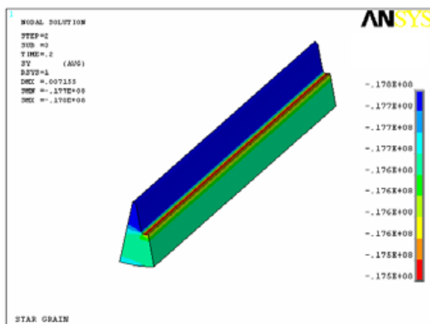


图 7-37 环向应力云图

06 等高线显示结果。由于云图显示是用颜色表示的结果，黑白显示效果并不明显，而等高线图可以很好地解决这个问题，等高线图可以按照如下步骤设置：

❶GUI 操作：Plot Ctrls > Device Options 在弹出的图 7-38 中将“Vector Mode（wireframe）”设置为“On”，可以发现在每条等应力线边上产生好多字母，可以在第 2 步修改。

❷GUI 操作：Plot Ctrls > Style > Contours > Contour Labeling，弹出如图 7-39 所示的云图标签设置，将“Key vector mode countour labels”的“on every Nth els” 填入一个数字看效果，直到觉得在每条等应力线边上的字母数差不多为止。

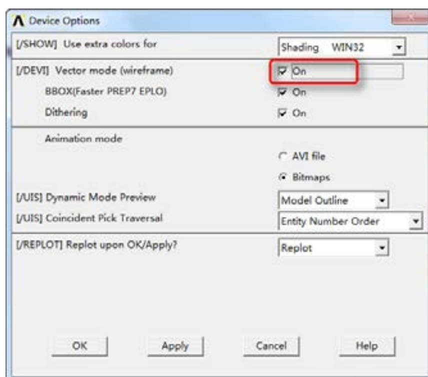


图 7-38 显示设置

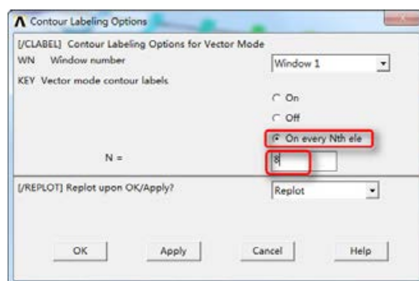


图 7-39 云图标签选项

❸GUI 操作：Plot Crtls > Style > Contours > Uniform Contours，弹出如图 7-40 所示的对话框，将“NCONT Number of contours”中填入等份数的数量。

❹GUI 操作：Plot Ctrls > Style > Colors > Banded Contours Colors，在弹出图 7-41 中将“band color”选择选定等应力线的颜色，选定等应力线由“N1,N2,INC”决定。

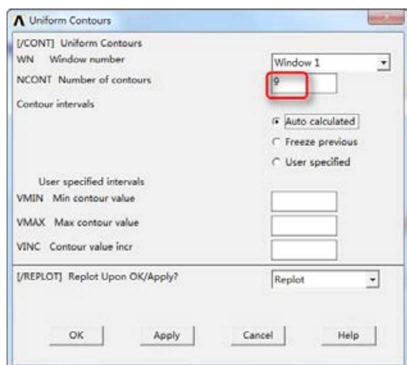


图 7-40 等高线设置

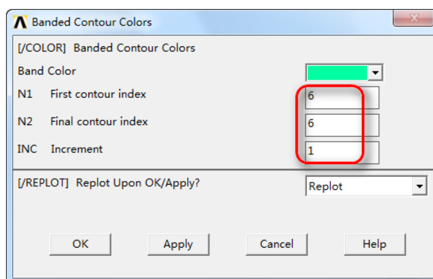


图 7-41 云图颜色设置

❺GUI 操作：Plot Ctrls > Windows Contours > Windows options 里面的选项都很有用，自己可以一个个试试效果。

❻GUI 操作：File > Report Generator 可以作出白底黑字的图片，如果觉得图片合适的话可以用 Plot Ctrls > Capture Image 把图片抓下来。

值得一提的是，单元解的显示跟节点解的显示方法是一样的，在这里不再详细说明，读者可参照之前的节点解显示方法。

```
等高线显示的命令流：
/POST1
!读入载荷步 2
SET,2
!设置变形结果显示
PLDISP，2
!设置变形比例因子
/DSCALE,,1
!将结果坐标系设置为柱坐标系
RSYS,1
!云图显示设置
!****以下设置窗口显示
/PLOPTS,LEG1,0
/PLOPTS,LEG2,0
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,DATE,0
/TRIAD,OFF
!****以下设置标签显示
/UDOC,,CNTR,RIGHT
!****以下设置标签显示
PLNSOL,S,EQV      !von Mises 应力显示
PLNSOL,EPTO,EQV      !von Mises 应变显示
!等高线显示
```

```
/DEVICE,VECTOR,1
/CLABEL,,8
```

07 列表显示结果。

GUI 操作：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution，该操作可以列表显示指定节点的值。比如要列表显示翼尖倒角处沿线上的节点的“Von Mises”应力，可以按照如下操作来完成：

❶选择翼尖倒角的线。

GUI 操作：Select > Entities，将弹出的对话框设置如图 7-42 所示。单击“OK”按钮，选择翼尖倒角的线 13。

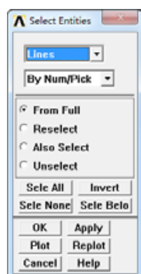


图 7-42 选择线操作

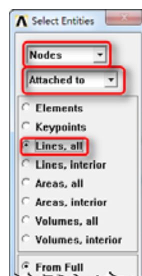


图 7-43 选择节点操作

❷选择翼尖倒角线上的节点。

GUI 操作：Select > Entities，将弹出的对话框设置如图 7-43 所示，单击“OK”按钮，这样选择了所有依附于该线上的节点。

❸列表显示节点值。

GUI 操作：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution，在弹出的对话框中选择 Stress > Von Mises Stress，单击“OK”按钮后将得到的这些节点的应变结果列表。

```
列表显示的命令流：
/PREP7
!选择线 13
LSEL,S,LINE,,13
!选择线 13 上的所有节点
NSLL,S,1
NPLOT
/POST1
!读入载荷步 2
SET,2
!列表显示节点值
PRNSOL,EPTO,PRIN
ALLSEL,ALL
```

08 路径显示。为了分析翼尖倒圆处的应变随轴向长度的变化，定义了两条路径来图形显示应变的变化情况，具体操作如下：

❶定义路径。

GUI 操作：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes，分别选择翼尖倒圆处线 13 的两端的两个节点，单击“OK”按钮后，弹出图 7-44 所示的对话框，设置路径名为“Wing1”，其他默认。用同样的方法设置翼尖倒圆处线 13 为路径，路径名为“Wing2”。

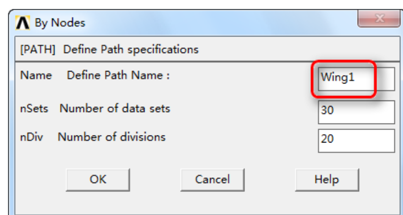


图 7-44 定义路径

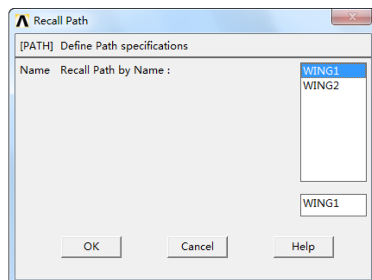


图 7-45 激活路径设置

❷映射路径数据。为了将结果映射到“Wing1”，需要将路径 1 先激活，GUI 操作：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Recall Path，在弹出图 7-45 中选择 Wing1，单击“OK”按钮。然后将数据映射到路径 1，GUI 操作：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Map onto Path，弹出如图 7-46 所示的对话框，将“Von Mises Strain”映射到路径 1。用同样的方法将“Von Mises Strain”映射到“Wing2”。

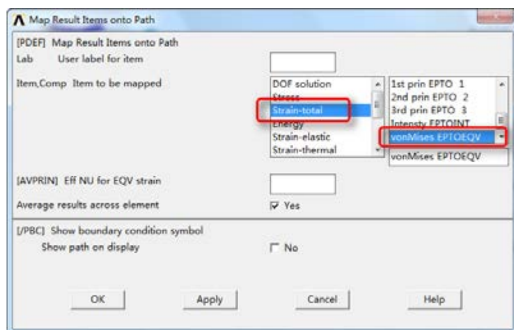


图 7-46 映射路径数据

❸观察结果。

GUI 操作：Main Menu > General Postproc > Path Operations > Plot Path Items > On Graph，在弹出如图 7-47 所示的对话框中选择“EPTOEQV”（Von Mises 应变），单击“OK”按钮将显示沿路径的应变变化结果（如图 7-48 所示）。

```
路径显示的命令流：
/POST1
!读入载荷步 2
SET,2
!定义路径 1
PATH,Wing1,2,30,20
PPATH,1,12
PPATH,2,1131
!定义路径 2
```

```
PATH,Wing2,2,30,20
PPATH,1,15
PPATH,2,1431
!激活路径 1
```

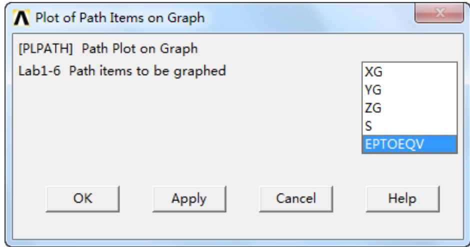


图 7-47 路径结果显示设置

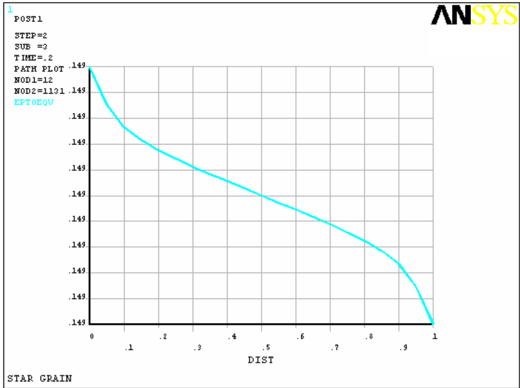


图 7-48 沿路径 1 的 Von Mises 应变图

```
PATH,Wing1
!将结果映射到路径 1
PDEF,,EPTO,EQV
!显示路径 1 的结果
PLPATH,EPTOEQV
!激活路径 2
PATH,Wing2
!将结果映射到路径 2
PDEF,,EPTO,EQV
!显示路径 2 的结果
PLPATH,EPTOEQV
PADEL,ALL
```

7.4.2 时间历程处理器

为了分析药柱结构随时间的变化情况，需要用到时间历程处理器来显示结果的变化。进入时间历程处理器的 GUI 操作：Main Menu > Time Hist Postpro，将弹出如图 7-49 所示的对话框。

01 定义变量。翼尖处的应力和应变是最为感兴趣和关注的部位，因此，选择翼尖倒圆处的节点作为分析研究的对象。

单击图 7-49 中的“Add Data”，将弹出如图 7-50 所示的对话框，选择 Nodal Solution > Elastic Strain > von Mises elastic strain（也可以采用 GUI 操作：Main Menu > Time Hist Postproc > Define Variables）。单击“OK”按钮后，在有限元模型上选择需要分析的节点（1427 号节点，位于翼尖倒圆处）。这时可以发现，在时间历程处理器的变量中多出了“EPELEQV_2”的变量，如图 7-51 所示。

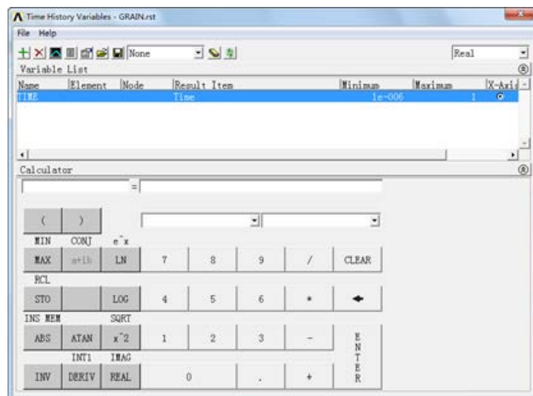


图 7-49　时间历程处理器变量

02 图形输出。选择要图形显示的变量“EPELEQV_2”，单击“Graph Data”，将在窗口中显示如图 7-52 所示的“Von Mises”应变随时间变化图（也可以采用 GUI 操作：Main Menu > Time Hist Postpro > Graph Variables）。同理也可以定义其他变量随时间的变化，通过分析我们发现该节点在 0.2s 处的应变最大，药柱在该时刻最容易出现危险。

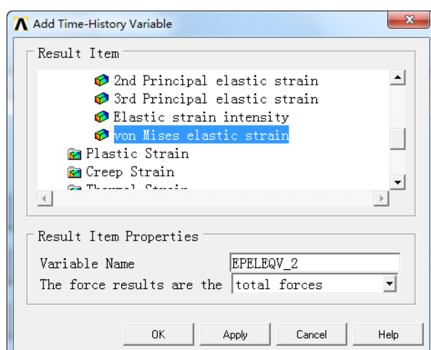


图 7-50　定义变量

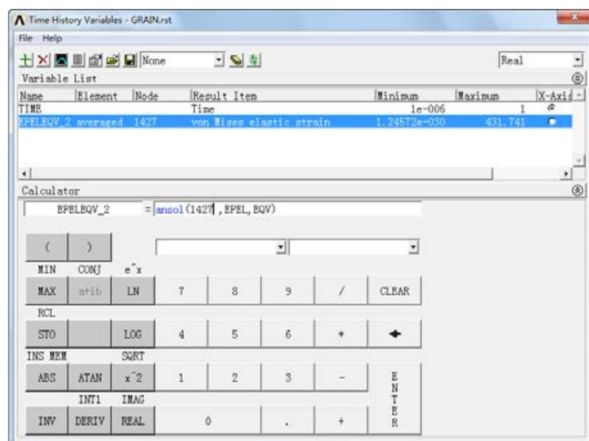


图 7-51　变量显示

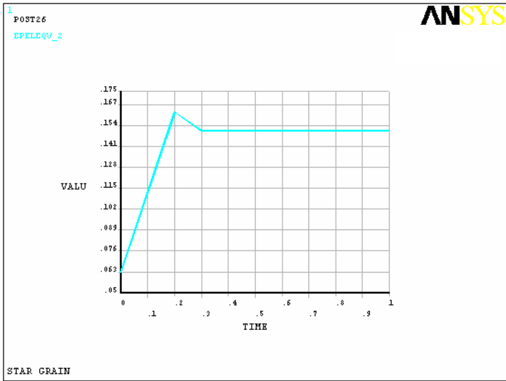


图 7-52　1427 节点处的应变随时间变化图

时间历程处理器后处理的命令流：

```
/POST26
!定义变量
ANSOL,2,1427,EPEL,EQV,EPELEQV_2
!图形显示
XVAR, 1
PLVAR,EPELEQV_2
```

03 计算结果列表。选择要列表显示的变量“EPELEQV_2”，单击“List Data”，将列表显示 1427 号节点的应变随时间变化数据如下（也可以采用 GUI 操作：Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > List）：

```
          ***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****
    TIME          1427 EPELEQV
                    EPELEQV_
                    2
  0.10000E-05     0.628043E-01
  0.20000         0.162230
  0.30000         0.150643
   1.0000         0.150643
```

第8章 静力分析

本章的结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；航空结构，如飞机机身；船舶结构等；同时还包括机械零部件，如活塞，传动轴等。

学习要点

- 有限单元法简介
- 静力分析介绍
- 悬臂梁的横向剪切应力分析

8.1 静力分析介绍

8.1.1 结构静力分析简介

1．结构分析概述

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。它包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；航空结构，如飞机机身；船舶结构等；同时还包括机械零部件，如活塞，传动轴等等。结构分析就是对这些结构进行分析计算。

在 ANSYS 产品家族中有 7 种结构分析的类型。结构分析中计算得出的基本未知量（节点自由度）是位移，其他的一些未知量，如应变，应力和反力可通过节点位移导出。各种结构分析的具体含义如下：

- ◆ 静力分析：用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析。而非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、大应变、超弹性、接触面和蠕变。
- ◆ 模态分析：用于计算结构的固有频率和模态。
- ◆ 谐波分析：用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。
- ◆ 瞬态动力分析：用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可计及上述提到的静力分析中所有的非线性性质。
- ◆ 谱分析：是模态分析的应用拓广，用于计算由于响应谱或 PSD 输入（随机振动）引起的应力和应变。
- ◆ 曲屈分析：用于计算曲屈载荷和确定曲屈模态。ANSYS 可进行线性（特征值）和非线性曲屈分析。
- ◆ 显式动力分析：ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题。

以上 7 种分析类型还有如下特殊的分析应用：

- ◆ 断裂力学。
- ◆ 复合材料。
- ◆ 疲劳分析。
- ◆ p-Method。

绝大多数的 ANSYS 单元类型可用于结构分析，所用的单元类型从简单的杆单元和梁单元一直到较为复杂的层合壳单元和大应变实体单元。

2．结构静力分析

从计算的线性和非线性的角度可以把结构分析分为线性分析和非线性分析，从载荷与时间的关系又可以把结构分析分为静力分析和动态分析，而线性静力分析是最基本的分析，这里专门介绍一下。

静力分析的定义：静力分析计算在固定不变的载荷作用下结构的效应，它不考虑

惯性和阻尼的影响，如结构随时间变化载荷的情况。可是，静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载荷和地震载荷）。线性分析是指在分析过程中结构的几何参数和载荷参数只发生微小的变化，以至可以把这种变化忽略，而把分析中的所有非线性项去掉。

静力分析中的载荷：静力分析用于计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定；即假定载荷和结构的响应随时间的变化非常缓慢。

静力分析所施加的载荷包括以下几种：

◆ 外部施加的作用力和压力。
◆ 稳态的惯性力（如重力和离心力）。
◆ 位移载荷。
◆ 温度载荷。

8.1.2 静力分析的类型

静力分析可分为线性静力分析和非线性静力分析，静力分析既可以是线性的也可以是非线性的。非线性静力分析包括所有的非线性类型：大变形、塑性、蠕变、应力刚化、接触（间隙）单元、超弹性单元等。本节主要讨论线性静力分析，非线性静力分析在另外一章中介绍。

从结构的几何特点上讲，无论是线性的还是非线性的静力分析都可以分为平面问题、轴对称问题和周期对称问题及任意三维结构。

8.1.3 静力分析基本步骤

1. 建模

建立结构的有限元模型，使用 ANSYS 软件进行静力分析，有限元模型的建立是否正确、合理，直接影响到分析结果的准确可靠程度。因此，在开始建立有限元模型时就应当考虑要分析问题的特点，对需要划分的有限元网格的粗细和分布情况有一个大概的计划。

2. 施加载荷和边界条件，求解

在上一步建立的有限元模型上施加载荷和边界条件并求解，这部分要完成的工作包括：指定分析类型和分析选项，根据分析对象的工作状态和环境施加边界条件和载荷，对结果输出内容进行控制，最后根据设定的情况进行有限元求解。

3. 结果评价和分析

求解完成后，查看分析的结果写进的结果文件“Jobname.RST”，结果文件由以下数据构成：

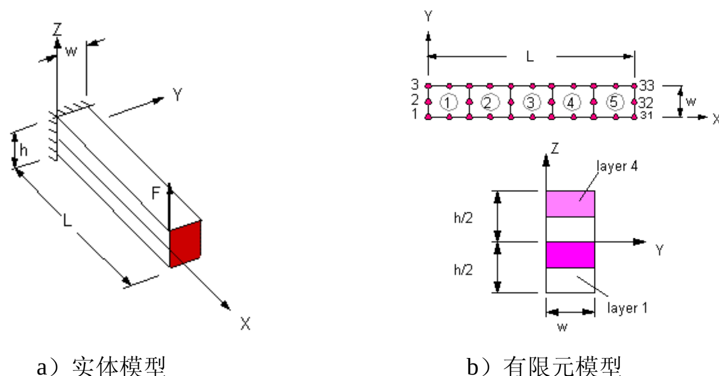
◆ 基本数据——节点位移（UX、UY、YZ、ROTX、ROTY、ROTZ）。
◆ 导出数据——节点单元应力、节点单元应变、单元集中力、节点反力等。

可以用 POST1 或 POST26 检查结果。POST1 可以检查基于整个模型的指定子步（时间点）的结果；POST26 用在非线性静力分析追踪特定结果。

8.2 实例导航——悬臂梁的横向剪切应力分析

8.2.1 问题的描述

如图 8-1a所示，一长度为L，宽度为w，高度为h的悬臂梁结构自由端受力F作用而弯曲，其有限元模型如图 8-1b所示，采用壳体单元（SHELL99），共有 4 层，每层有指定的材料特性和厚度。其拉压破坏和剪切破坏应力分别为σ_xf，σ_yf，σ_zf和σ_{xy}f。



a）实体模型　　b）有限元模型

图 8-1 悬臂梁示意图

悬臂梁尺寸及材料特性如下（采用英制单位）：

$E = 30\times10^6$ psi，$\upsilon = 0$，$\sigma_x f = 25000$ psi，$\sigma_{xy} f = 500$ psi。

$\sigma_y f = 3000$ psi，$\sigma_z f = 5000$ psi。

L = 10.0 in，w = 1.0 in，h = 2.0 in，$F_1 = 10000$ lb。

8.2.2 GUI路径模式

01 建立模型。

❶定义工作文件名：Utility Menu > File > Change Jobname，弹出如图 8-2 所示的“ChangeJobname”对话框，在“Enter new jobname”文本框中输入“Beam”，并将“New Log and error files”复选框选为“yes”，单击“OK”按钮。

❷定义工作标题：Utility Menu > File > Change Title，在出现的对话框中输入“TRANSVERSE SHEAR STRESSES IN A CANTILEVER BEAM”，如图 8-3 所示，单击“OK”按钮。

❸关闭三角坐标符号：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window options，弹出如图 8-4 所示的 “Window Options”对话框，在“Location of triad”下拉式选择框中，选择“Not shown”，单击“OK”按钮。

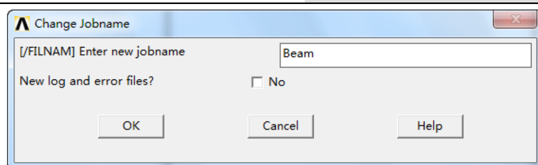


图 8-2 “Change Jobname”对话框

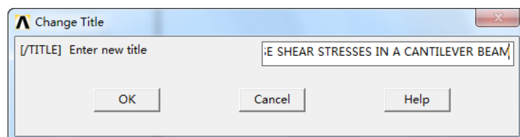


图 8-3 “Change Title”对话框

❹选择单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，弹出如图 8-5 所示的“Element Types”对话框，单击“Add”按钮，弹出如图 8-6 所示的“Library of Element Types”对话框，在选择框中分别选择“Structural Shell”和“3D 8node 281”，单击“OK”按钮。

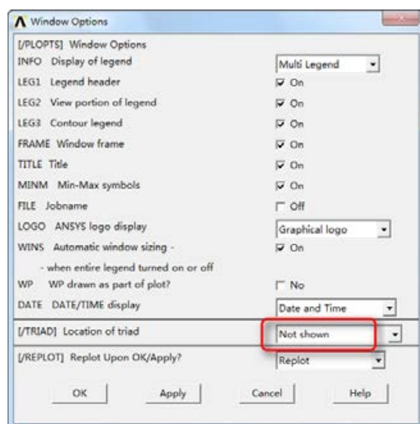


图 8-4 “Window Options”对话框

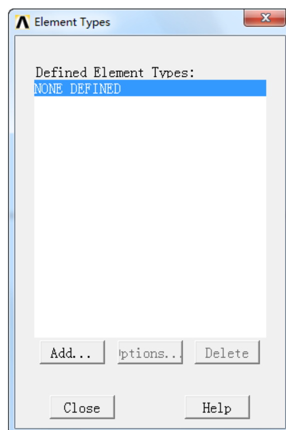


图 8-5 “Element Types”对话框

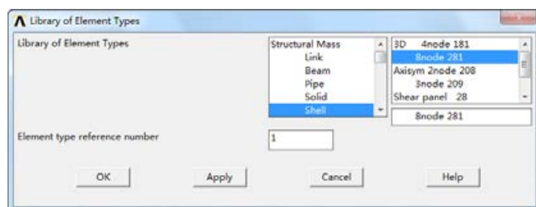


图 8-6 “Library of Element Types”对话框

❺设置单元属性：单击“Element Type”对话框上的“Options”选项，弹出如图 8-7 所示的“ShELL281 element type option”对话框，单击选择“Storage of layer data K8”后面的下拉式选择栏中的“All layers + Middle ”选项。单击“OK”按钮。然后

单击“Element Type”对话框的“Close”按钮，关闭该对话框。

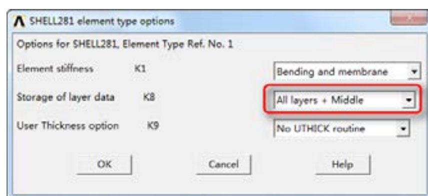


图 8-7 “Shell281 element type option”对话框

❻设置材料属性：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出如图 8-8 所示的“Define Material Model Behavior”对话框，在“Material Model Available”下面的选择栏中，单击打开 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，又弹出如图 8-9 所示的“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“EX”后面的输入栏中输入“3e6”，在“PRXY”后面的输入栏中输入“0”，单击“OK”按钮，然后单击菜单栏上的 Material > Exit 选项，完成材料属性的设置。

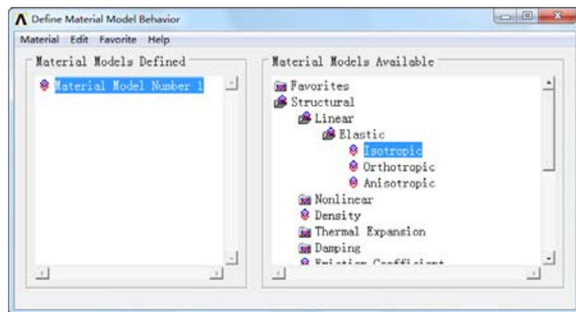


图 8-8 “Define Material Model Behavior”对话框

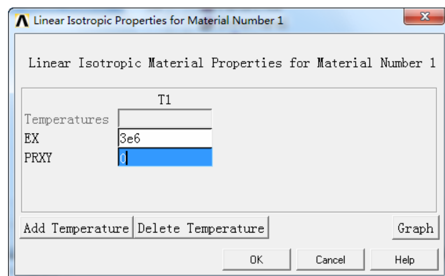


图 8-9 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框

❼划分层单元，Main Menu>Preprocessor>Sections>Reinforcing>Add / Edit，弹出如图 8-10 所示的“Create and Modify Shell Sections”对话框，单击 “Add Layer” 添加层，分别创建“Thickness” 为 0.5、 “Integration Pts” 为 5 的 4 层，单击“OK”按钮。

❽创建两个单元节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出如图 8-11 所示的“Create Nodes in Active Coordiante System”对话框，在“Node Number”后面的输入栏中输入 1，单击“Apply”按钮，又弹出此对话框，在

“Node Number”后面的输入栏中输入 3，在“X，Y，Z Location in active CS”后面的输入栏中分别输入“0，1，0”，单击“OK”按钮。

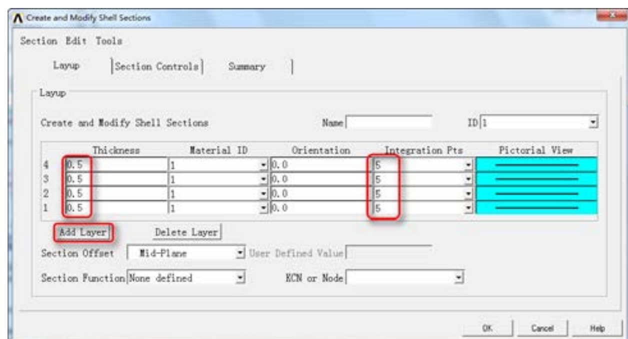


图 8-10 “Create and Modify Shell Sections”对话框

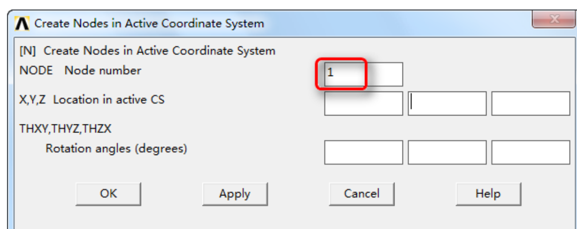


图 8-11 “Create Nodes in Active Coordiante System”对话框

❾创建第三个节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Fill between Nds，弹出一个拾取框，在图形上拾取编号为 1 和 3 的节点，单击“OK”按钮，又弹出如图 8-12 所示的“Create Nodes Between 2 Nodes”对话框，单击“OK”按钮。生成的结果如图 8-13 所示。

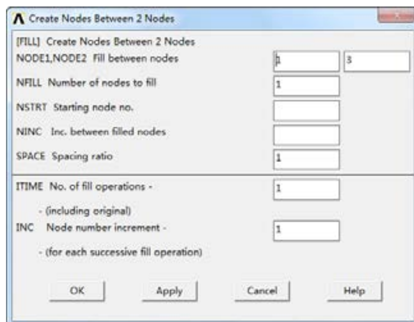


图 8-12 “Create Nodes Between 2 Nodes”对话框

❿复制其他节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Nodes > Copy，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮，又弹出如图 8-14 所示的“Copy nodes”对话框，在“Total number of copies”后面的输入栏中输入 11，在“X-offset in active CS”后面的输入栏中输入 1，单击“OK”按钮，结果生成如图 8-15 所示的图形。

⑪连接节点生成单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，弹出一个拾取框，依次拾取图形上编号为 1，7，9，3，4，8，6，2 的节点，单击“OK”按钮。



图 8-13 节点生成图形显示

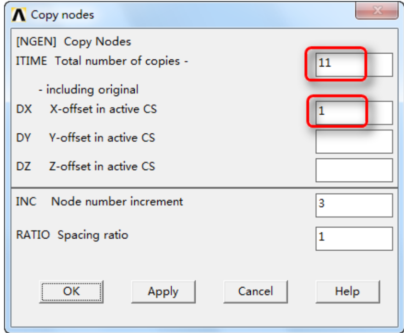


图 8-14 “Copy nodes”对话框

3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33
2 5 8 11 14 17 20 23 26 29 32
1 4 7 10 13 16 19 22 25 28 31

图 8-15 节点生成图形显示

⑫复制生成其他单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered，弹出一个拾取框，单击拾取图形上刚刚生成的单元，单击“OK”按钮，又弹出如图 8-16 所示的“Copy Elements（Automatically-Numbered）”对话框，在“Total number of copies”后面的输入栏中输入 5，在“Node number Increment”后面的输入栏中输入 6，在“X-offset in active”后面的输入栏中输入 2，单击“OK”按钮，生成的结果如图 8-17 所示。

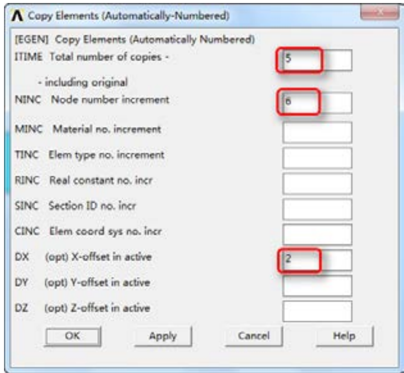


图 8-16 “Copy Elements（Automatically-Numbered）”对话框

3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33
2 5 8 14 20 26 32
1 4 7 10 13 16 19 22 25 28 31

图 8-17 有限元模型显示

⑬保存有限元模型：单击菜单栏上的 File > Save as 选项，弹出一个对话框，在“Save database to”下面的输入栏中输入“beamfea.db”，单击“OK”按钮。

02 设置破坏准则。Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Change Mat Props > Material Models，弹出如图 8-18 所示的“Define Material Model Behavior”对话框，单击选择“Material Models Available”下的“Failure Criteria”选项，弹出如图 8-19 所示的“Failure CriteriaTable for Material Number 1”对话框，在“Criteria 3”后面的下拉式选择栏中选中“Tsai-Wu”选项，在“Temps”输入栏后输入 0，在 xTenStrs，yTenStrs，zTenStrs，和 xyShStrs 后面的输入栏中分别输入 25000、3000、5000、500。单击“OK”按钮。

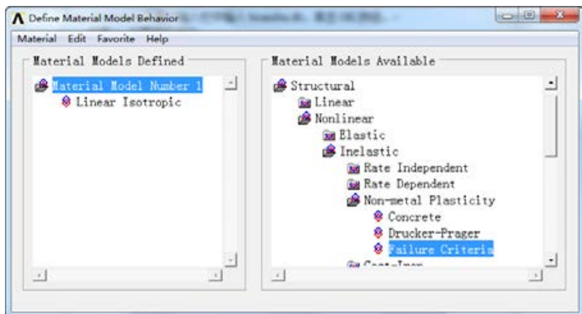


图 8-18 “Define Material Model Behavior”对话框

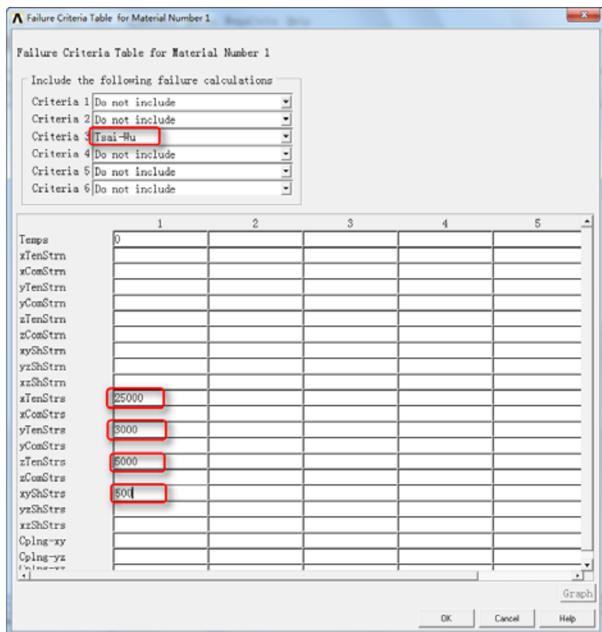


图 8-19 “Failure Criteria Table for Material Number 1”对话框

03 施加载荷。

❶选择固定端的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 8-20 所示的“Select Entities”对话框，单击选择第二个下拉式选择栏选中“By Location”项，在

“Min，Max”下的输入栏中输入 0，单击“OK”按钮。

❷施加位移约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮，又弹出如图 8-21 所示的“Apply U，ROT on Nodes”对话框，在“Dofs to be constrained”后面的选择栏中单击选中“All DOF”选项，单击“OK”按钮，结果如图 8-22 所示。

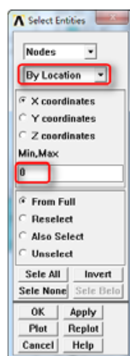


图 8-20 “Select Entities”对话框

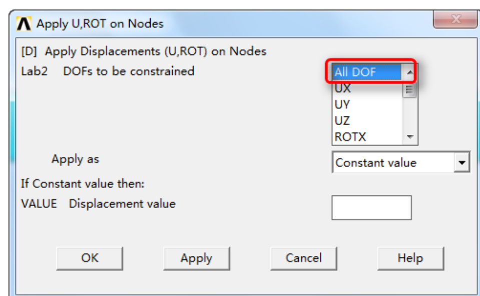


图 8-21 “Apply U，ROT on Nodes”对话框

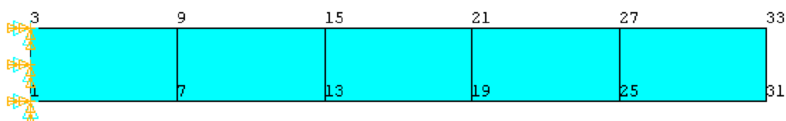


图 8-22 施加位移约束图形显示

❸选择自由端的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 8-20 所示的“Select Entities”对话框，单击选择第二个下拉式选择栏选中“By Location”项，在“Min，Max”下的输入栏中输入 10，单击“OK”按钮。

❹定义自由端节点的耦合程度：Main Menu > Preprocessor > Coupling / Ceqn > Couple DOFs，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮，又弹出如图 8-23 所示的“Define Coupled DOFs”对话框，在输入栏中输入 1，在“Degree of freedom label”后面的下拉式选择栏中选中“UZ”，单击“OK”按钮。

❺施加集中载荷：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes，弹出一个拾取框，在图形上拾取编号为 31 的节点，单击“OK”按钮，弹出如图 8-24 所示的“Apply F/M on Nodes”对话框，在“Direction of force/mom”后面的下拉式选择栏中选中“FZ”，在“Force/moment value”后面的输入栏中输入 10000。单击“OK”按钮。

❻选择所有节点：Utility Menu > Select > Everything。

❼保存数据：单击菜单栏上的“SAVE_DB”按钮。

04 求解。

❶设置分析类型：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis，弹出如图 8-25 所示的“New Analysis”对话框，单击“Static”前面的单选按钮，单击“OK”按钮。



图 8-23　“Define Coupled DOFs”对话框

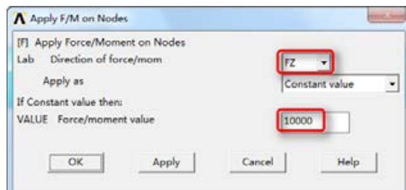


图 8-24　“Apply F/Mon Nodes”对话框

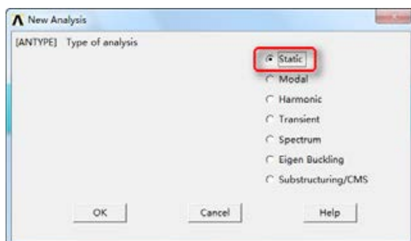


图 8-25　“New Analysis”对话框

❷求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出一个信息提示框和对话框，浏览完毕后单击 File > Close，单击对话框上的“OK”按钮，开始求解运算，当出现一个 Solution is done 的信息框时，单击“Close”按钮，完成求解运算。

05 检查结果。

❶定义最大切应力表格参数：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table，弹出如图 8-26 所示的“Element Table Data”对话框，单击“Add”按钮，又弹出如图 8-27 所示的“Define Additonal Element Table Items”对话框，在“User label for item”后面的输入栏中输入“ILSXZ”，单击选择“Item，Comp Results data item”后面的“By sequence num”和“SMISC”，在输入栏中输入“SMISC，68”，单击“Apply”按钮。

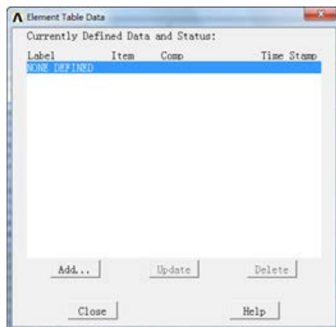


图 8-26　“Element Table Data”对话框

❷定义其他表格参数：弹出如图 8-27 所示的“Define Additonal Element Table Items”对话框，重复上述过程定义“SXZ”和“ILMX”这些参数。单击“OK”按钮，结果如图 8-28 所示。



图 8-27 “Define Additonal Element Table Items”对话框

❸获取定义的 XSZ 表格参数：Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data，弹出如图 8-29 所示的“Get Scalar Data”对话框，在选择栏中分别选择“Results data”和“Elem table data”，单击“OK”按钮，弹出如图 8-29 所示的“Get Element Table Data”对话框，在“Name of parameter to be defined”后面的输入栏中输入“SIGXZ1”，在“Element number N”后面的输入栏中输入 4，在“Elem table data to be retrieved”后面的下拉式选择栏中选中“XSZ”，单击“Apply”按钮。

❹获取其他定义表格参数：弹出如图 8-30 所示对话框，重复第❸步，获取“ILSXZ，ILMX”这些定义的表格参数。



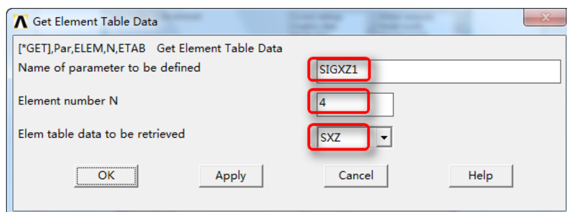


图 8-28 “Element Table Data”对话框　　图 8-29 “Get Element Table Data”对话框

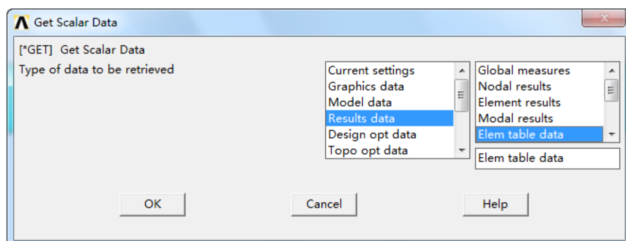


图 8-30 “Get Scalar Data”对话框

❺定义参数数组：Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit，弹出“Array Parameter”对话框，单击“Add”按钮，又弹出如图 8-31 所示的“Add New Array Parameter”对话框，在“Parameter name”后面的输入栏中输入“VALUE”，在“I，J，K No. of rows，cols，planes”后面的输入栏中分别输入“4，3，0”。单击“OK”按钮。

❻对定义数组的第一列赋值：Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Fill，弹出如图 8-32 所示的“Fill Array Parameter”对话框，单击选择“Specified Values”选

项，单击“OK”按钮，弹出如图 8-33 所示的“Fill Array Parameter with Sperified Values”对话框，在“Result array parameter”后面的输入栏中输入“VALUE（1，1)”，在后面的数值栏中依次输入“0，5625，7500，225”，单击“Apply”按钮。

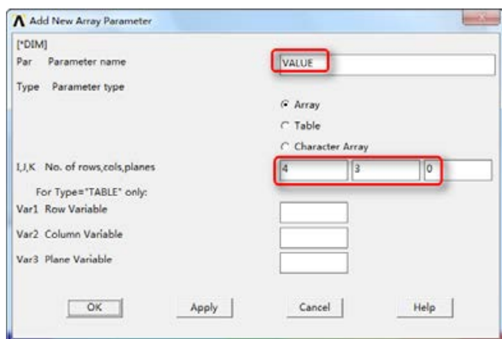


图 8-31 “Add New Array Parameter”对话框

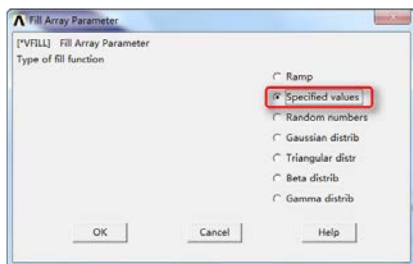


图 8-32 “Fill Array Parameter”对话框

❼对定义数组的第二列赋值：弹出如图 8-32 所示对话框，单击选择“Specified Values”选项，单击“OK”按钮，弹出如图 8-33 所示对话框，在“Result array parameter”后面的输入栏中输入“VALUE（1，2)”，在后面的数值栏中依次输入“SIGXZ1，SIGXZ2，SIGXZ3，FC3”，单击“Apply”按钮。

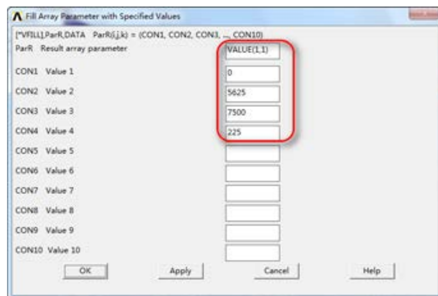


图 8-33 “Fill Array Parameter With Sperified Values”对话框

❽对定义数组的第三列赋值：弹出如图 8-32 所示对话框，单击选择“Specified Values”选项，单击“OK”按钮，弹出如图 8-33 所示对话框，在“Result array parameter”后面的输入栏中输入“VALUE（1，2)”，在后面的数值栏中依次输入“ABS(SIGXZ2/5625)，ABS(SIGXZ3/7500)，ABS(FC3/225)”，单击“OK”按钮。

❾结果输出到文件：Utility Menu > File > Switch Output to > File，在输入栏中输入

"beam.vrt"。单击"OK"按钮。

⑩Von-mises 应力云图显示：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solution，弹出如图 8-34 所示的"Contour Element Solution Data"对话框，在"Item to be contoured"后面的选择栏中分别选中 Stress > Von Mises Stress，单击"OK"按钮，结果如图 8-35 所示。

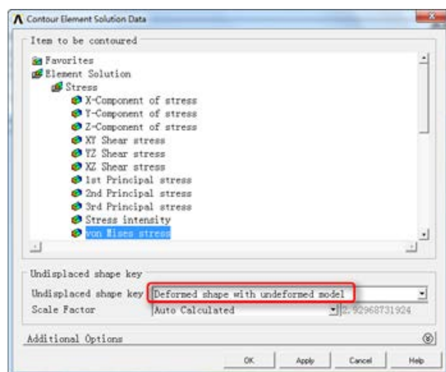


图 8-34 "Contour Element Solution Data"对话框

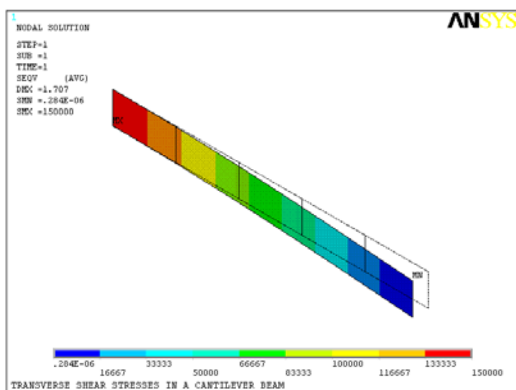


图 8-35 "Von-Mises"应力云图显示

06 退出 ANSYS。单击工具栏上的"QUIT"，在出现的对话框上选择"QUIT－No Save"，单击"OK"按钮。

8.2.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

8.3 实例导航——联轴体的静力分析实例

本节将介绍工程中最常见的问题：三维问题。在实际问题中,任何一个物体严格地说都是空间物体,它所受的载荷一般都是空间的，任何简化分析都会带来误差。

本节通过对联轴体应力分析，来介绍 ANSYS 三维问题的分析过程。

8.3.1 问题描述

考查联轴体在工作时发生的变形和产生的应力。如图 8-36 所示，联轴体在底面的四周边界不能发生上下运动，即不能发生沿轴向的位移；在底面的两个圆周上不能发生任何方向的运动；在小轴孔的孔面上分布有 1e6Pa 的压力；在大轴孔的孔台上分布有 1e7Pa 的压力；在大轴孔的键槽的一侧受到 1e5Pa 的压力。

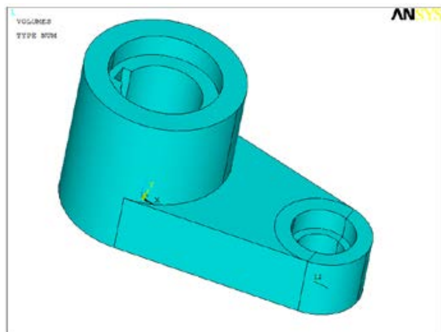


图 8-36 联轴体

8.3.2 建立模型

01 设定分析作业名和标题。在进行一个新的有限元分析时，通常需要修改数据库名，并在图形输出窗口中定义一个标题来说明当前进行的工作内容。另外，对于不同的分析范畴（结构分析、热分析、流体分析、电磁场分析等），ANSYS 所用的主菜单的内容不尽相同，为此，需要在分析开始时选定分析内容的范畴，以便 ANSYS 显示出与其相对应的菜单选项。其具体步骤为：

❶从实用菜单中选择 Utility Menu： File > Change Jobname 命令，将打开“Change Jobname”对话框，如图 8-37 所示。

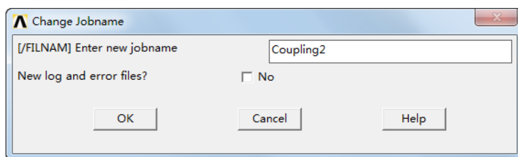


图 8-37 修改文件名对话框

❷在“Enter new jobname”文本框中输入文字“Coupling2”，为本分析实例的数据库文件名。

❸单击“OK”按钮，完成文件名的修改。

❹从实用菜单中选择 Utility Menu： File > Change Title 命令，打开“Change Title”对话框，如图 8-38 所示。

❺在“Enter new title”（输入新标题）文本框中输入文字“static analysis of a rod”，为本分析实例的标题名。

❻单击“OK”按钮，完成对标题名的指定。

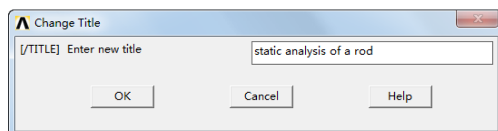


图 8-38 修改标题对话框

❼从实用菜单中选择 Utility Menu： Plot > Replot 命令，指定的标题“static analysis of a rod”将显示在图形窗口的左下角。

❽从主菜单中选择 Main Menu： Preference 命令，将打开“Preference of GUI Filtering”（菜单过滤参数选择）对话框,如图 8-39 所示，选中“Structural”复选框，单击“OK”按钮确定。

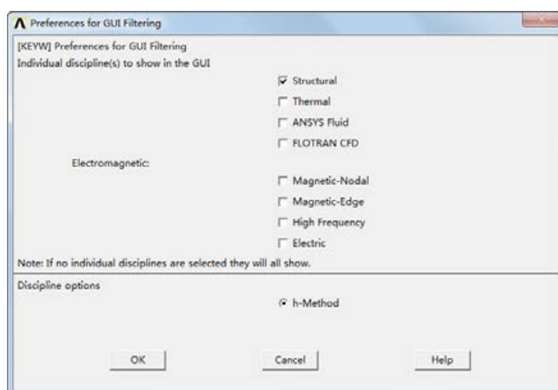


图 8-39 “Preference of GUI Filtering”对话框

02 定义单元类型。在进行有限元分析时，首先应根据分析问题的几何结构、分析类型和所分析的问题精度要求等，选定适合具体分析的单元类型。本例中选用十节点四面体实体结构单元 Tet 10Node 187。Tet 10Node 187 可用于计算三维问题。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete 命令，将打开“Element Type”（单元类型）对话框，如图 8-40 所示。

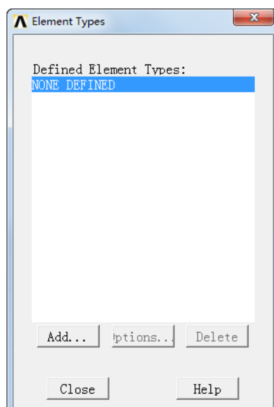


图 8-40 单元类型对话框

❷单击“Add…”按钮，将打开“Library of Element Type”(单元类型库)，如图 8-

41 所示。

❸选择“Solid”选项，选择实体单元类型。

❹在列表框中选择“Tet 10Node 187”选项，选择十节点四面体实体结构单元“Tet 10Node 187”。

❺单击“OK”按钮，将“Tet 10Node 187”单元添加，并关闭单元类型对话框，同时返回到第❶步打开的单元类型对话框，如图 8-42 所示。

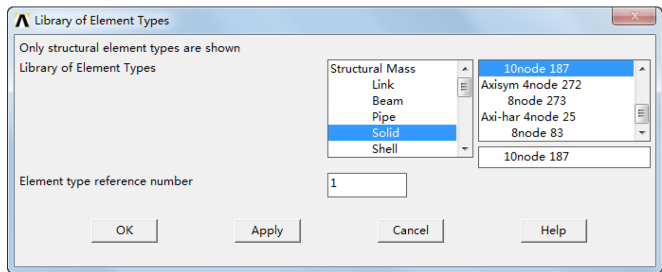


图 8-41 单元类型库对话框

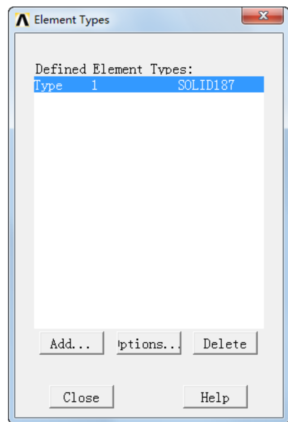


图 8-42 单元类型对话框

❻该单元不需要进行单元选项设置，单击“Close…”按钮，关闭单元类型对话框，结束单元类型的添加架。

03 定义实常数。在实例中选用十节点四面体实体结构单元“Tet 10Node 187”单元，不需要设置实常数。

04 定义材料属性。考虑惯性力的静力分析中必须定义材料的弹性模量和密度。具体步骤如下：

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Material Props > Materia Model 命令，打开“Define Material Model Behavior”（定义材料模型属性）窗口，如图 8-43 所示。

❷依次单击 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，展开材料属性的树形结构。将打开 1 号材料的弹性模量 EX 和泊松比 PRXY 的定义对话框，如图 8-44 所示。

❸在对话框的“EX”文本框中输入弹性模量“2.06e11”，在“PRXY”文本框中输

入泊松比 0.3。

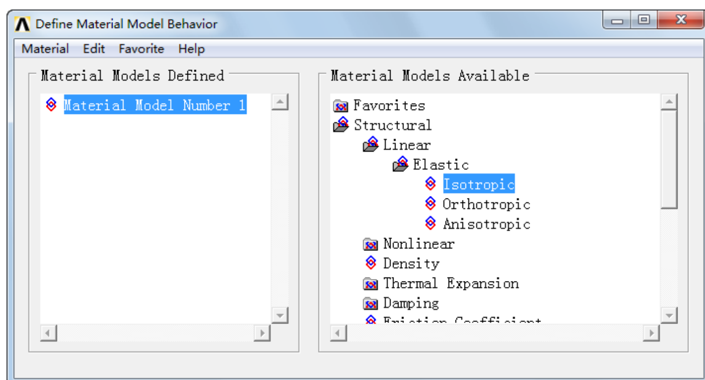


图 8-43 定义材料模型属性窗口

❹单击“OK”按钮，关闭对话框，并返回到定义材料模型属性窗口，在此窗口的左边一栏出现刚刚定义的参考号为 1 的材料属性。

❺在“Define Material Model Behavior”窗口中，从菜单选择 Material > Exit 命令，或者单击右上角 X 按钮，退出定义材料模型属性窗口，完成对材料模型属性的定义。

05 建立联轴体的三维实体模型。按照前面章节介绍的方法建立联轴体的三维实体模型，如图 8-45 所示。

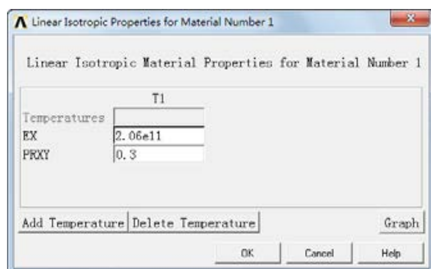


图 8-44 线性各向同性材料的弹性模量和泊松比

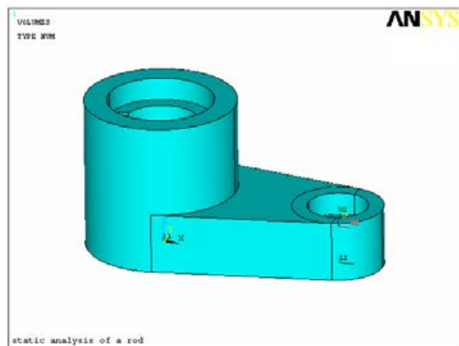


图 8-45 建立三维模型

06 划分网格。本节选用 Tet 10Node 187 单元对三维实体划分自由网格。

❶从主菜单中选择 Main Menu： Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，打开“Mesh Tool”（网格工具），如图 8-46 所示。

❷单击 Line 域 Set 按钮，打开线选择对话框，要求选择定义单元划分数的线。选择大轴孔圆周，单击“OK”按钮。

❸ANSYS 会提示线划分控制的信息，在“No.of element divisions”文本框中输入 10，单击“OK”确定，如图 8-47 所示。

❹在对话框中，选择“Mesh”域中的“Volumes”，单击“Mesh”，打开体选择对话框，要求选择要划分数的体。单击“Pick All”按钮，如图 8-48 所示。

❺ANSYS 会根据进行的线控制划分体，划分后如图 8-49 所示。



图 8-46 网格工具

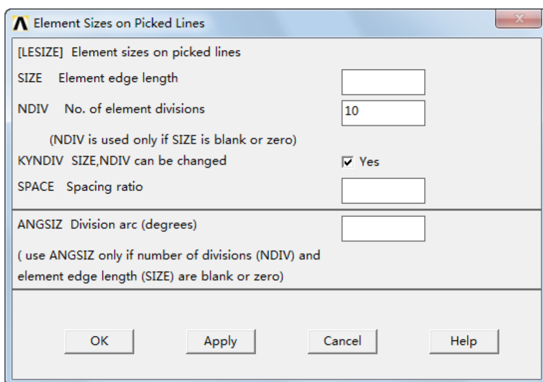


图 8-47 控制线分网

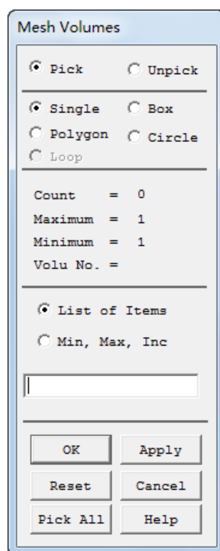


图 8-48 选择体

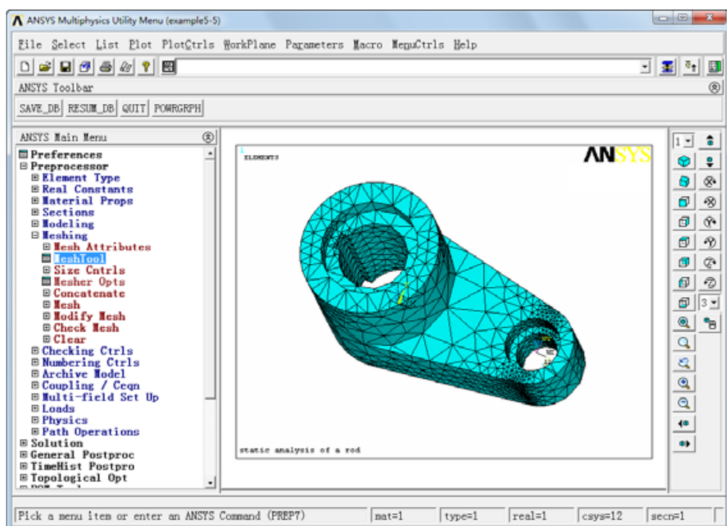


图 8-49 划分后的体

8.3.3 定义边界条件并求解

建立有限元模型后，就需要定义分析类型和施加边界条件及载荷，然后求解。其具体步骤为：

01 基座的底部施加位移约束。

❶从主菜单中选择 Main Menu： Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > on Lines。

❷拾取基座底面的所有外边界线，单击“OK”按钮，如图 8-50 所示。

❸选择“UZ”作为约束自由度，单击“OK”按钮，如图 8-51 所示。

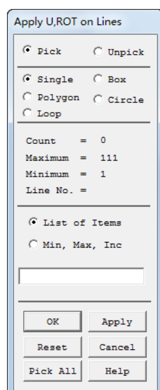


图 8-50 选择线

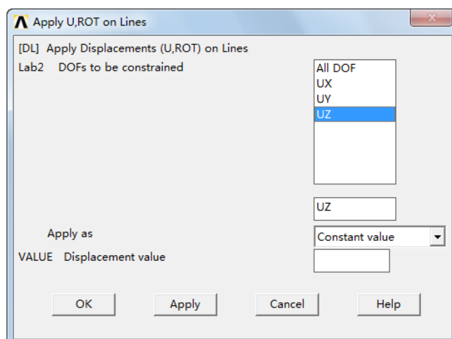


图 8-51 施加 Z 方向位移

❹从主菜单中选择 Main Menu：Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > on Lines

❺拾取基座底面的两个圆周线，单击“OK”按钮。选择“All DOF”作为约束自由度，单击“OK”按钮，结果如图 8-52 所示。

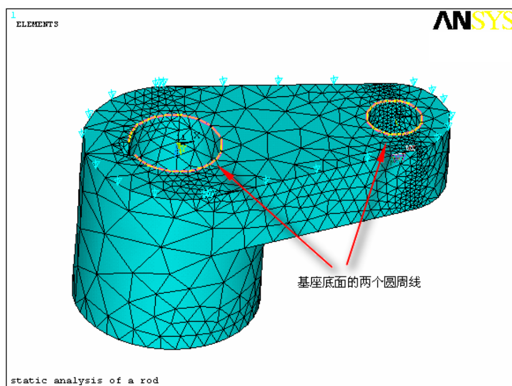


图 8-52 施加位移约束的结果

02 在小轴孔圆周面上、大轴孔轴台上和键槽的一侧施加压力载荷。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Areas。

❷选择小轴孔的内圆周面和小轴孔的圆台，单击“OK”按钮，如图 8-53 所示。

❸打开“Apply PRES on areas” 对话框，在“Load PRES value”文本框中输入“1e6”，单击“OK”按钮，如图 8-54 所示。

所得结果如图 8-55 所示。

❹用同样方法在大轴孔轴台上和键槽的一侧施加分别施加大小为 1e7 和 1e5 压力载荷。

❺从应用菜单中选择 Utility Menu： PlotCtrls > Symbols …在“Show pres and convect as”（用表面上的线显示压力值）栏中，选择“Face outlines”，单击“OK”按

钮，如图 8-56 所示。

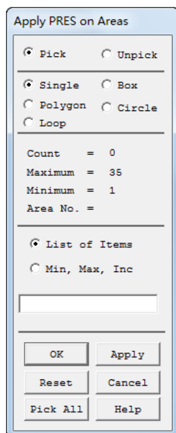


图 8-53 选择面

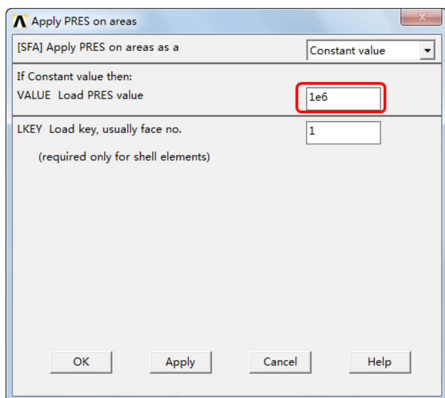


图 8-54 定义压力的大小

❻从应用菜单中选择 Utility Menu： Plot > Areas 结果如图 8-57 所示。

❼单击“SAVE-DB”按钮，保存数据库。

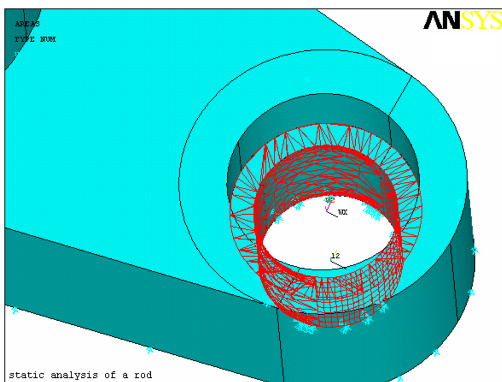


图 8-55 在圆周面上施加压力的结果

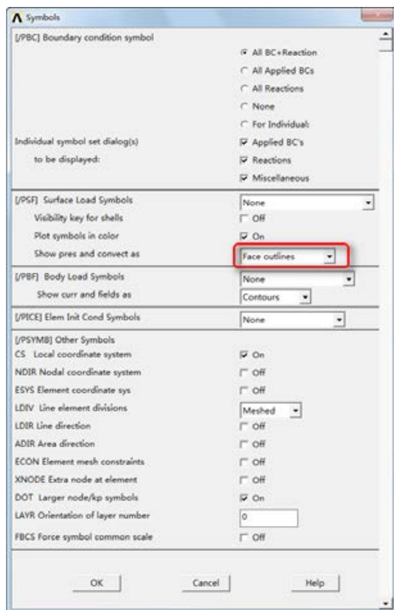


图 8-56 显示载荷符号

03 进行求解。

❶从主菜单中选择 Main Menu： Solution > Solve > Current LS 命令，打开一个确认对话框和状态列表，如图 8-58 所示，要求查看列出的求解选项。

❷查看列表中的信息确认无误后，单击“OK”按钮，开始求解。求解过程中会有一些进度的显示，如图 8-59 所示。

❸求解完成后打开如图 8-60 所示的提示求解结束对话框。

❹单击“Close”按钮，关闭提示求解结束对话框。

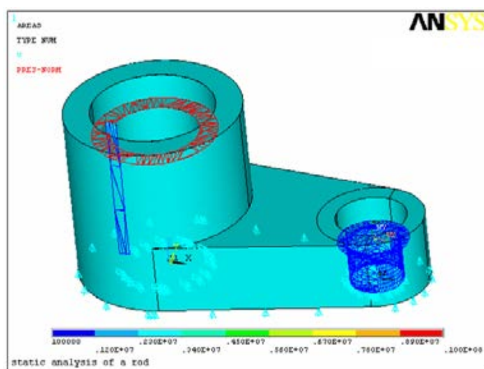


图 8-57 显示载荷

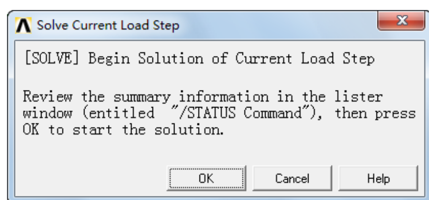


图 8-58 求解当前载荷步确认对话框

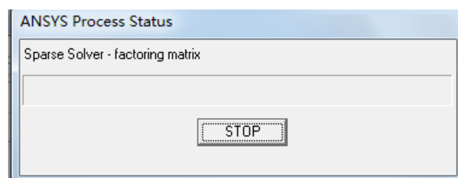


图 8-59 进度显示

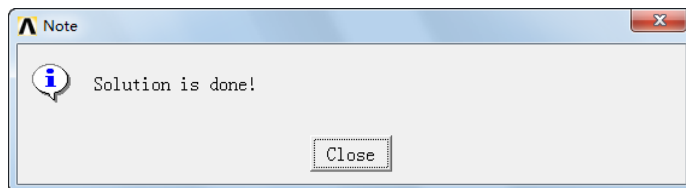


图 8-60 提示求解完成

8.3.4 查看结果

求解完成后，就可以利用 ANSYS 软件生成的结果文件（对于静力分析，就是 Jobname.RST）进行后处理。静力分析中通常通过 POST1 后处理器就可以处理和显示大多数感兴趣的结果数据。

01 查看变形。三维实体需要查看 3 个方向的位移和总的位移。

❶从主菜单中选择 Main Menu： General Postproc > Plot Result > Contour Plot > Nodal Solu 命令，打开“Contour Nodal Solution Data”（等值线显示节点解数据）对话框，如图 8-61 所示。

❷在“Item to be contoured”（等值线显示结果项）域中选择“DOF solution”（自由度解）选项。

❸在列表框中选择“X-Component of displacement”（X 向位移）选项。

❹选择“Deformed shape with undeformed edge”（变形后和未变形轮廓线）单选按钮。

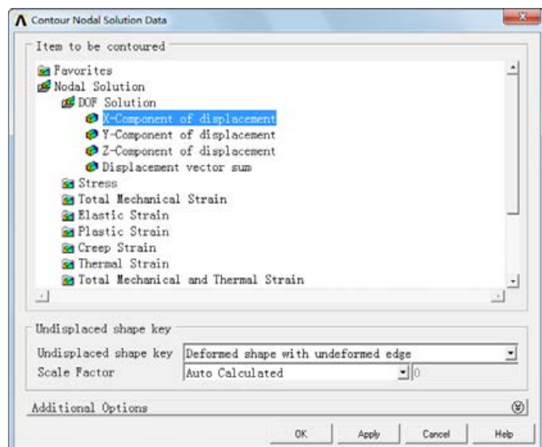


图 8-61 等值线显示节点解数据对话框

❺单击“OK”按钮，在图形窗口中显示出变形图，包含变形前的轮廓线，如图 8-62 所示。图中下方的色谱表明不同的颜色对应的数值（带符号）。

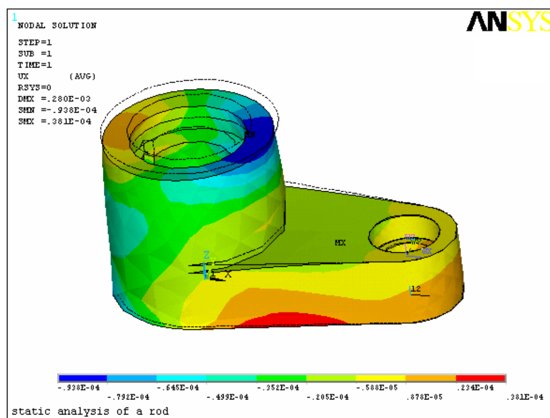


图 8-62　X 方向的位移

❻用同样的方法查看 Y 方向的位移，如图 8-63 所示。

❼用同样的方法查看 Z 方向的位移，如图 8-64 所示。

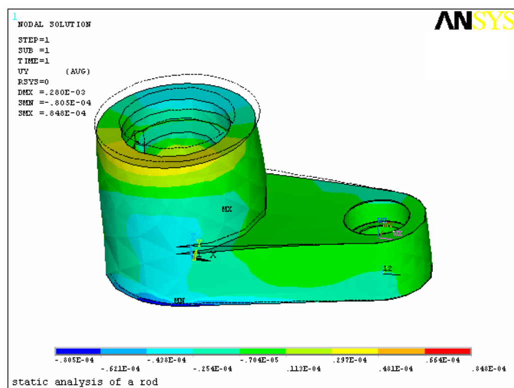


图 8-63　Y 方向的位移

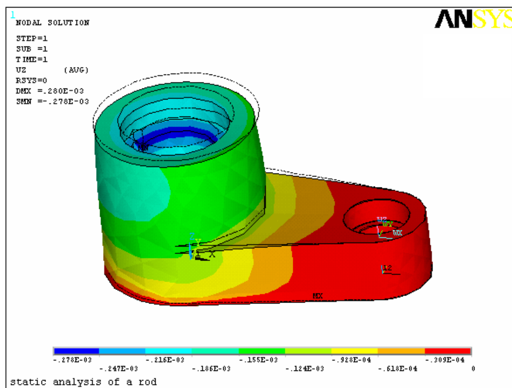


图 8-64　Z 方向的位移

❽用同样的方法查看总的位移，如图 8-65 所示。

02 查看应力。

❶从主菜单中选择 Main Menu： General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，打开“Contour Nodal Solution Data”（等值线显示节点解数据）对话框，如图 8-66 所示。

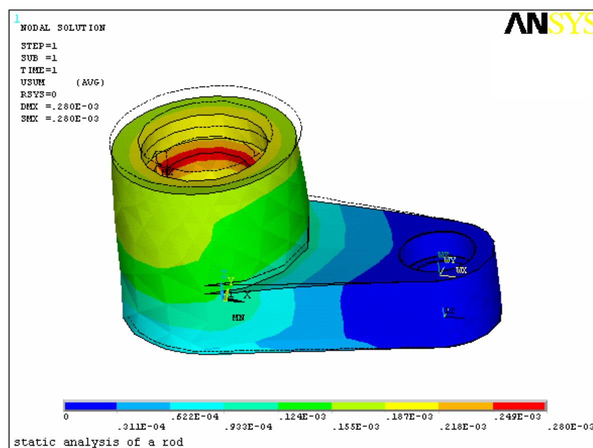


图 8-65 总的位移

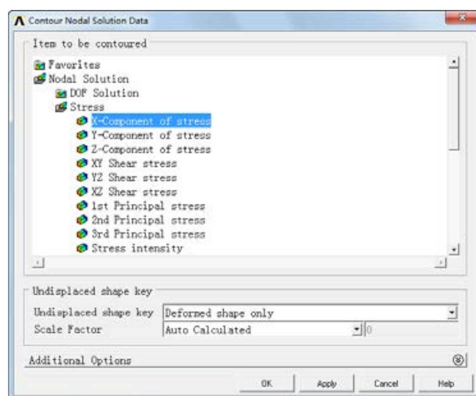


图 8-66 等值线显示节点解数据对话框

❷在“Item to be contoured”（等值线显示结果项）域中选择“Stress”（应力）选项。

❸在列表框中选择“X-Component of stress”（X 方向应力）选项。

❹选择“Deformed shape only”（仅显示变形后模型）单元选项按钮。

❺单击“OK”按钮，图形窗口中显示出 X 方向（径向）应力分布图，如图 8-67 所示。

❻用同样的方法查看 Y 方向的应力，如图 8-68 所示。

❼用同样的方法查看 Z 方向的应力，如图 8-69 所示。

❽从主菜单中选择 Main Menu：General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，打开“Contour Nodal Solution Data ”对话框。

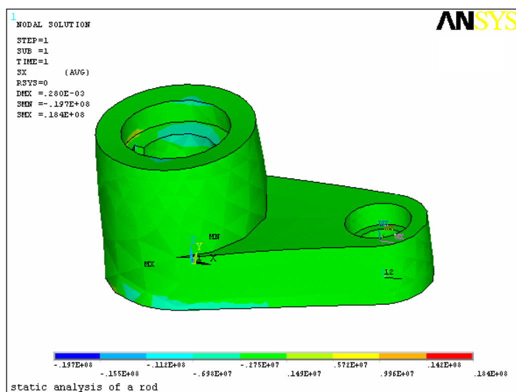


图 8-67　X 方向的应力

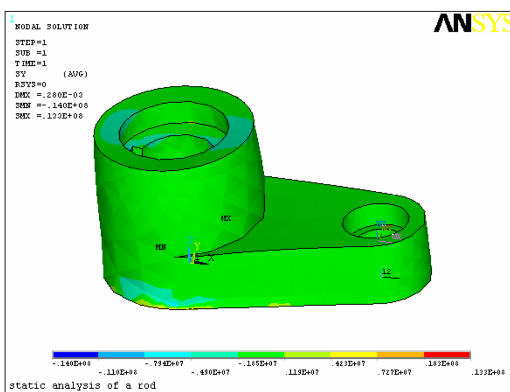


图 8-68　Y 方向的应力

❾在 Item to be contoured 域左边的列表中选择“Stress”选项。

❿在列表框中选择“von Mises SEQV”选项。

⓫选择“Deformed shape only”单选按钮。

⓬单击“OK”按钮，图形窗口中显示出“von Mises”等效应力分布图，如图 8-70 所示。

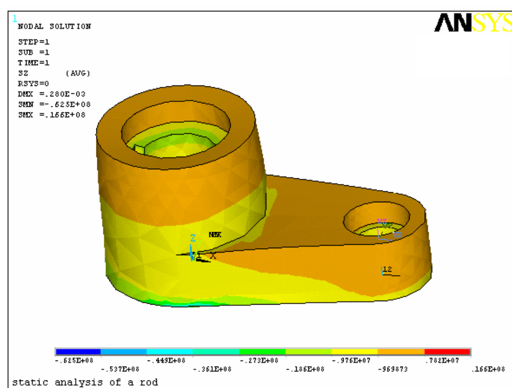


图 8-69　Z 方向的应力

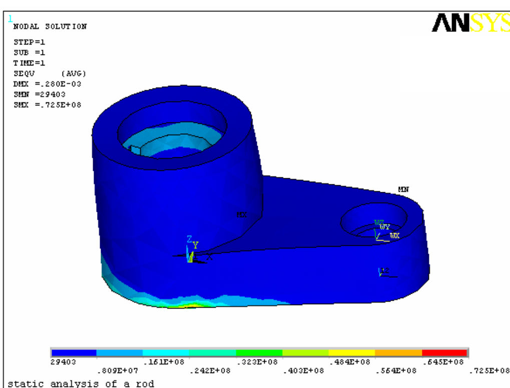


图 8-70　“von Mises”等效应力分布

03 应力动画。

❶从应用菜单中选择 Utility Menu：PlotCtrls > Animate > Deformed Results ...。

❷选择“stress”，选择“von Mises”，单击“OK”按钮，如图 8-71 所示。

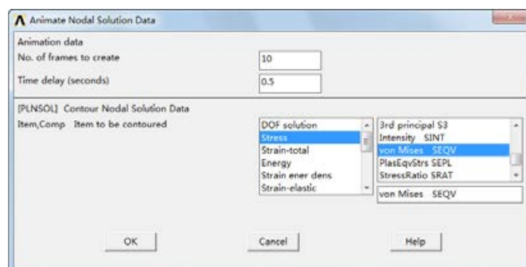


图 8-71 选择动画内容

❸要停止播放变形动画，拾取“Stop”按钮，如图 8-72 所示。

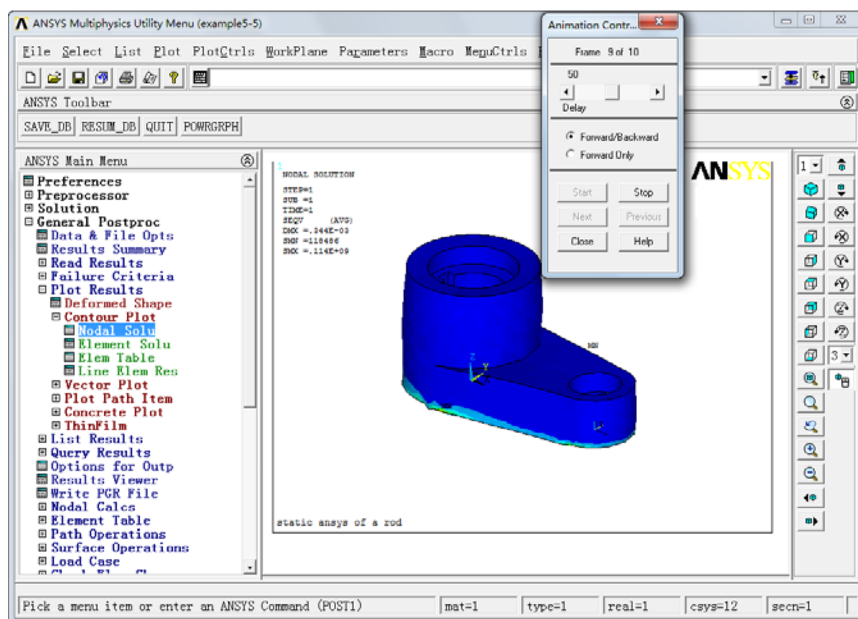


图 8-72 播放动画

8.3.5 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 9 章

非线性分析

非线性变化是日常生活和科研工作中经常碰到的情形。本章介绍了 ANSYS 非线性分析的全流程步骤，详细讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过几个实例对 ANSYS 非线性分析功能进行了具体演示。

通过本章的学习，可以完整深入地掌握 ANSYS 非线性分析的各种功能和应用方法。

学 习 要 点

- 非线性分析概论
- 非线性分析的基本步骤
- 螺栓的蠕变分析

9.1 非线性分析概论

在日常生活中，会经常遇到结构非线性。例如，无论何时用钉书针钉书，金属钉书钉将永久地弯曲成一个不同的形状，如图 9-1a 所示；如果你在一个木架上放置重物，随着时间的迁移它将越来越下垂，如图 9-1b 所示；当在汽车或卡车上装货时，它的轮胎和下面路面间接触将随货物重量而变化，如图 9-1c 所示。如果将上面例子的载荷—变形曲线画出来，将会发现它们都显示了非线性结构的基本特征：变化的结构刚性。

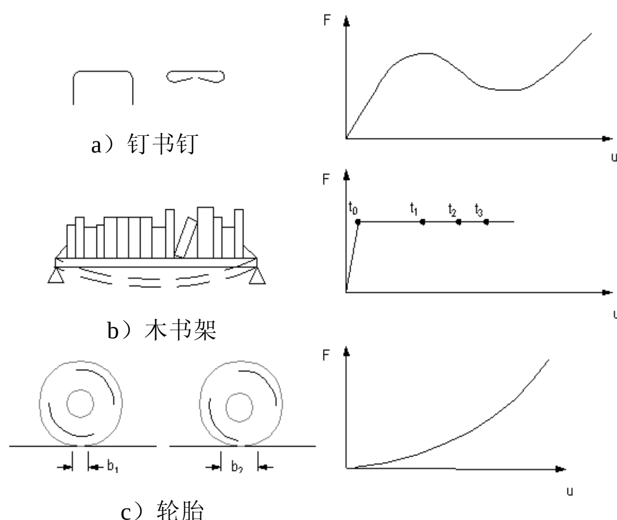


图 9-1 非线性结构行为的普通例子

9.1.1 非线性行为的原因

引起结构非线性的原因很多，它可以被分成 3 种主要类型：

（1）状态变化（包括接触）。许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为，例如，一根只能拉伸的电缆可能是松散的，也可能是绷紧的。轴承套可能是接触的，也可能是不接触的，冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。状态改变也许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。ANSYS 程序中单元的激活与杀死选项用来给这种状态的变化建模。

接触是一种很普遍的非线性行为，接触是状态变化非线性类型中一个特殊而重要的子集。

（2）几何非线性。如果结构经受大变形，它变化的几何形状可能会引起结构的非线性响应。例如，如图 9-2 所示，随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以致于动力臂明显地

减少，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。

（3）材料非线性。非线性的应力-应变关系是造成结构非线性的常见原因。许多因素可以影响材料的应力-应变性质，包括加载历史（如在弹-塑性响应状况下），环境状况（如温度），加载的时间总量（如在蠕变响应状况下）。

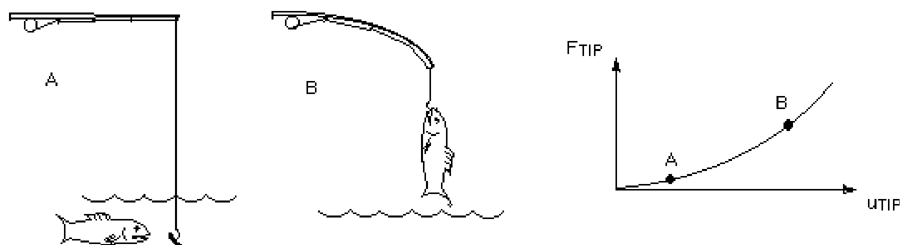


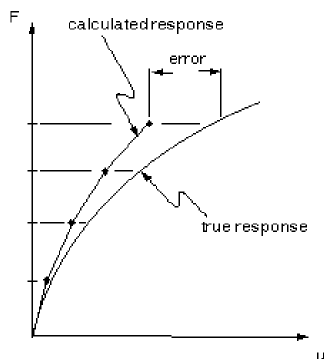
图 9-2 钓鱼杆示范几何非线性

9.1.2 非线性分析的基本信息

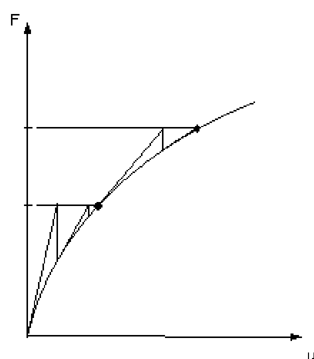
ANSYS 程序的方程求解器计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而，非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程表示。需要一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

1．非线性求解方法

一种近似的非线性求解是将载荷分成一系列的载荷增量。可以在几个载荷步内或者在一个载荷步的几个子步内施加载荷增量。在每一个增量的求解完成后，继续进行下一个载荷增量之前程序调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。遗憾的是，纯粹的增量近似不可避免地随着每一个载荷增量积累误差，导至结果最终失去平衡，如图 9-3a 所示。



a）普通增量式解



b）全牛顿－拉普森迭代求解（2 个载荷增量）

图 9-3 纯粹增量近似与牛顿－拉普森近似的关系

ANSYS 程序通过使用牛顿－拉普森平衡迭代克服了这种困难，它迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛（在某个容限范围内）。图 9-3b 描述了在单自由度非线性分析中牛顿－拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前，NR 方法估算出残差矢量，这个矢

量是回复力（对应于单元应力的载荷）和所加载荷的差值。程序然后使用非平衡载荷进行线性求解，且核查收敛性。如果不满足收敛准则，重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。

ANSYS 程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性，如自适应下降，线性搜索，自动载荷步及二分法等，可被激活来加强问题的收敛性，如果不能得到收敛，那么程序要么继续计算下一个载荷步要么终止（依据用户的指示而定）。

对某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析，如果仅仅使用 NR 方法，正切刚度矩阵可能变为降秩矩阵，导致严重的收敛问题。这样的情况包括独立实体从固定表面分离的静态接触分析，结构或者完全崩溃或者“突然变成”另一个稳定形状的非线性弯曲问题。对这样的情况，可以激活另外一种迭代方法，弧长方法，来帮助稳定求解。弧长方法导致 NR 平衡迭代沿一段弧收敛，从而即使当正切刚度矩阵的倾斜为零或负值时，也往往阻止发散。这种迭代方法以图形表示在图 9-4 中。

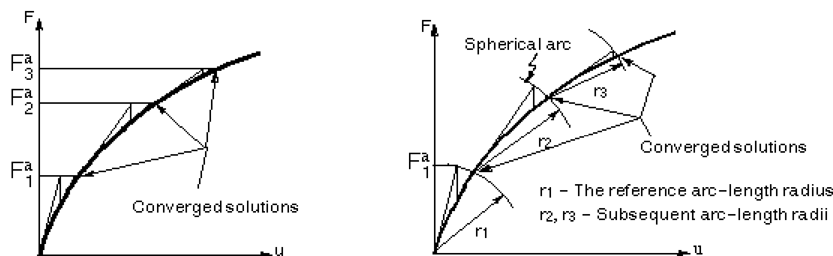


图 9-4 传统的 NR 方法与弧长方法的比较

2. 非线性求解级别

非线性求解被分成 3 个操作级别：

（1）“顶层”级别由在一定“时间”范围内你明确定义的载荷步组成。假定载荷在载荷步内是线性地变化的。

（2）在每一个载荷子步内，为了逐步加载可以控制程序来执行多次求解（子步或时间步）。

（3）在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代以获得收敛的解。

图 9-5 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷历史。

3. 载荷和位移的方向改变

当结构经历大变形时应该考虑到载荷将发生了什么变化。在许多情况中，无论结构如何变形施加在系统中的载荷保持恒定的方向。而在另一些情况中，力将改变方向，随着单元方向的改变而变化。



在大变形分析中不修正节点坐标系方向。因此计算出的位移在最初的方向上输出。

ANSYS 程序对这两种情况都可以建模，依赖于所施加的载荷类型。加速度和集中力将不管单元方向的改变而保持它们最初的方向，表面载荷作用在变形单元表面的法向，

且可被用来模拟“跟随”力。图 9-6 说明了恒力和跟随力。

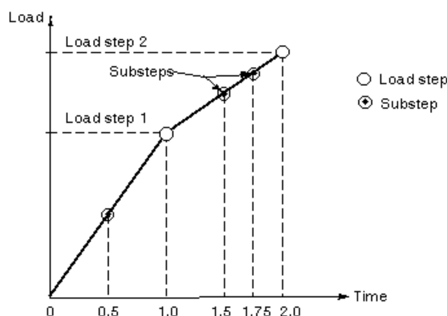


图 9-5 载荷步、子步、及“时间”关系图

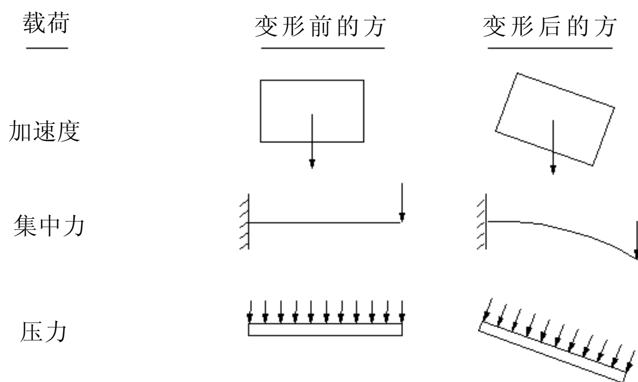


图 9-6 变形前后载荷方向

4. 非线性瞬态过程分析

非线性瞬态过程的分析与线性静态或准静态分析类似：以步进增量加载，程序在每一步中进行平衡迭代。静态和瞬态处理的主要不同是在瞬态过程分析中要激活时间积分效应。因此，在瞬态过程分析中“时间”总是表示实际的时序。自动时间分步和二等分特点同样也适用于瞬态过程分析。

9.1.3 几何非线性

小转动（小挠度）和小应变通常假定变形足够小以至于可以不考虑由变形导致的刚度阵变化，但是大变形分析中，必须考虑由于单元形状或者方向导致的刚度阵变化。使用命令 NLGEOM,ON（GUI ：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control (: Basic Tab) 或者 Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options)，可以激活大变形效应（针对支持大变形的单元）。对于大多数实体单元（包括所有大变形单元和超弹单元）和大多数梁单元和壳单元都支持大变形。

大变形过程在理论上并没有限制单元的变形或者转动（实际的单元还是要受到经验

变形的约束，即不能无限大），但求解过程必须保证应变增量满足精度要求，即总体载荷要被划分为很多小步来加载。

1. 大应变大挠度（大转动）

所有梁单元和大多数壳单元以及其他的非线性单元都有大挠度（大转动）效应，可以通过命令 NLGEOM,ON（GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control (: Basic Tab) 或者 Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options）来激活该选项。

2. 应力刚化

结构的面外刚度有时候会受到面内应力的明显影响，这种面内应力与面外刚度的耦合，即所谓的应力刚化，在面内应力很大的薄结构（例如缆索、隔膜）中非常明显。

因为应力刚化理论通常假定单元的转动和变形都非常小，所以它是应用小转动或者线性理论。但在有些结构里面，应力刚化只有在大转动（大挠度）下才会体现，如图 9-7 所示结构。

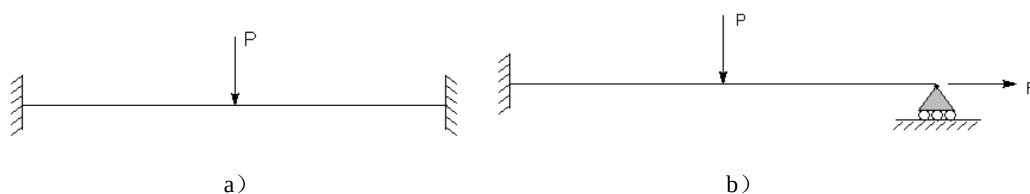


图 9-7 应力刚化的梁

可以在第一个载荷步中利用命令“PSTRES,ON”（GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options）激活应力刚化选项。

大应变和大转动分析过程理论上包括初始应力的影响，多于大多数单元，在使用命令“NLGEOM,ON”（GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control (: Basic Tab) 或者 Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options）激活大变形效应时，会自动包括初始刚度的影响。

3. 旋转软化

旋转软化会调整（软化）旋转结构的刚度矩阵来考虑动态质量的影响，这种调整近似于在小挠度分析中考虑大挠度圆周运动引起的几何尺寸的变化，它通常与由旋转模型的离心力所产生的预应力[PSTRES]（GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options）一起使用。



旋转软化不能与其他的几何非线性、大转动或者大应变同时使用。

利用命令“OMEGA” 和“CMOMEGA KSPIN”选项（GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Angular Velocity）来激活旋转软化效应。

📖9.1.4 材料非线性

在求解过程中，与材料相关的因子会导致结构的刚度变化。塑性、多线性和超弹性的非线性应力-应变关系会导致结构刚度在不同载荷阶段（典型的，例如不同温度）发生变化。蠕变、粘弹性和粘塑性的非线性则与时间、速度、温度以及应力相关。

如果材料的应力-应变关系是非线性的或者跟速度相关，必须利用“TB”命令族（, TBTEMP, TBDATA,TBPT,TBCOPY,TBLIST,TBPLOT,TBDELE）（GUI：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Nonlinear）用数据表的形式来定义非线性材料特性。下面对不同的材料非线性行为选项做简单介绍。

1. 塑性

对于多数工程材料，在达到比例极限之前，应力-应变关系都采用线性形式。超过比例极限之后，应力-应变关系呈现非线性，不过通常还是弹性的。而塑性，则以无法恢复的变形为特征，在应力超过屈服极限之后就会出现。因为通常情况下比例极限和屈服极限只有微小的差别，在塑性分析中 ANSYS 程序假定这两点重合，如图 9-8 所示。

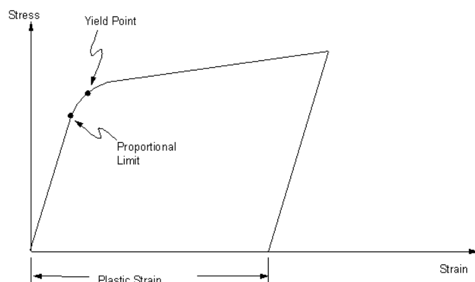


图 9-8 塑性应力-应变关系

塑性是一种不可恢复、与路径相关的变形现象。换句话说，施加载荷的次序以及在何种塑性阶段施加将影响最终的结果。如果想在分析中预测塑性响应，则需要将载荷分解成一系列增量步（或者时间步），这样模型才可能正确的模拟载荷－响应路径。每个增量步（或者时间步）的最大塑性应变会储存在输出文件（Jobname.OUT）里面。

自动步长调整选项 [AUTOTS]（GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control (: Basic Tab)或者 Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps) 会根据实际的塑性变形调整步长，当求解迭代次数过多或者塑性应变增量大于 15％时会自动缩短步长。如果采用的步长过长，ANSYS 程序会减半或者采用更短的步长，具体菜单如图 9-9 所示。

在塑性分析时，可能还会同时出现其他非线性特性。例如，大转动（大挠度）和大应变的几何非线性通常伴随塑性同时出现。如果想在分析中加入大变形，可以用命令 NLGEOM（GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control (: Basic Tab)或者 Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options）激活相关选

项。对于大应变分析，材料的应力-应变特性必须是用真实应力和对数应变输入的。

2. 多线性

多线性弹性材料行为选项（MELAS）描述一种保守响应（与路径无关），其加载和卸载沿相同的应力/应变路径。所以，对于这种非线性行为，可以使用相对较大的步长。

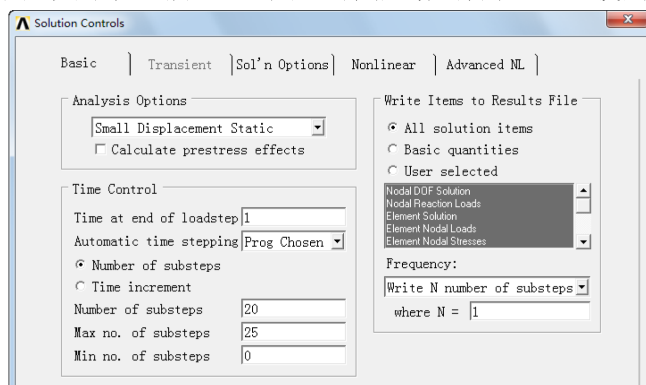


图 9-9 自动步长调整选项对话框

3. 超弹性

如果存在一种弹性能函数（或者应变能密度函数），它是应变或者变形张量的比例函数，对相应应变项求导就能得到相应应力项，这种材料通常被成为超弹性。

超弹性可以用来解释类橡胶材料（例如人造橡胶）在经历大应变和大变形时（需要[NLGEOM,ON]）其体积变化非常微小（近似于不可压缩材料）。一种有代表性的超弹结构（气球封管）如图 9-10 所示。

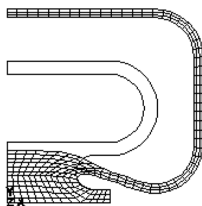


图 9-10 超弹结构

有两种类型的单元适合模拟超弹材料：

（1）超弹单元（HYPER56, HYPER58, HYPER74, HYPER158）

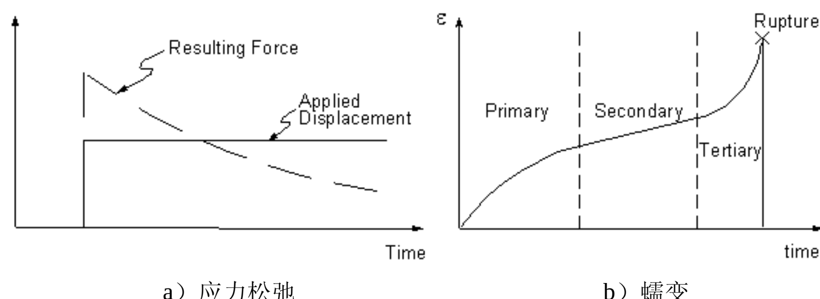
（2）除了梁杆单元以外，所有编号为 18x 的单元（, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187）

4. 蠕变

蠕变是一种跟速度相关的材料非线性，它指当材料受到持续载荷作用的时候，其变形会持续增加。相反地，如果施加强制位移，反作用力（或者应力）会随着时间慢慢减小（应力松弛，如图 9-11a 所示）。蠕变的三个阶段如图 9-11b 所示。ANSYS 程序可以模拟前两个阶段，第三个阶段通常不分析，因为它已经接近破坏程度。

在高温应力分析中，例如原子反应器，蠕变是非常重要的。例如，如果在原子反应

器施加预载荷以防止邻近部件移动，过了一段时间之后（高温），预载荷会自动降低（应力松弛），以致邻近部件开始移动。对于预应力混凝土结构，蠕变效应也是非常显著的，而且蠕变是持久的。



a）应力松弛　　b）蠕变

图 9-11 应力松弛和蠕变

ANSYS 程序利用两种时间积分方法来分析蠕变，这两种方法都适用于静力学分析和瞬态分析。

（1）隐式蠕变方法：该方法功能更强大、更快、更精确，对于普通分析，推荐使用。其蠕变常数依赖于温度，也可以与各向同性硬化塑性模型耦合。

（2）显式蠕变方法：当需要使用非常短的时间步长时，可考虑该方法，其蠕变常数不能依赖于温度，另外，可以通过强制手段与其他塑性模型耦合。

需要注意以下几个方面：

隐式和显式这两个词是针对蠕变的，不能用于其他环境，例如，没有显式动力分析的说法，也没有显式单元的说法。

隐式蠕变方法支持如下单元： PLANE42, SOLID45, PLANE82, SOLID92, SOLID95, LINK180, SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, BEAM188, 和 BEAM189。

显式蠕变方法支持如下单元：LINK1, PLANE2, LINK8, PIPE20, BEAM23, BEAM24, PLANE42, SHELL43, SOLID45, SHELL51, PIPE60, SOLID62, SOLID65, PLANE82, SOLID92, 和 SOLID95.

5. 形状记忆合金

形状记忆合金（SMA）材料行为选项指镍钛合金的过弹性行为。镍钛合金是一种柔韧性非常好的合金，无论在加载卸载时经历多大的变形都不会留下永久变形，如图 9-12 所示，材料行为包含 3 个阶段：奥氏体阶段（线弹性）、马氏体阶段（也是线弹性）和两者间的过渡阶段。

利用 MP 命令定义奥氏体阶段的线弹性材料行为，利用“TB，SMA”命令定义马氏体阶段和过渡阶段的线弹性材料行为。另外，可以用“TBDATA”命令输入合金的指定材料参数组，总共可以输入 6 组参数。

形状记忆合金可以使用如下单元： PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187。

6. 粘弹性

粘弹性类似于蠕变，不过当去掉载荷时，部分变形会跟着消失。最普遍的粘弹性材料是玻璃，部分塑料也可认为是粘弹性材料。图 9-13 表示一种粘弹性。

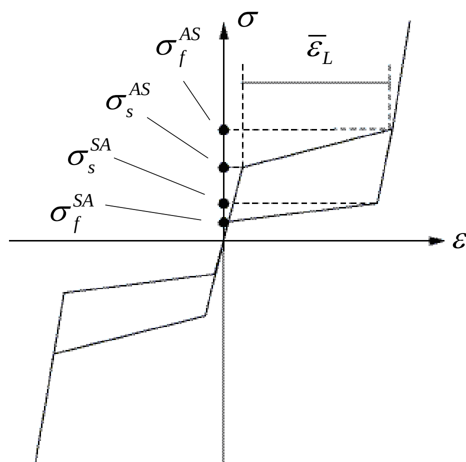


图 9-12 形状记忆合金状态图

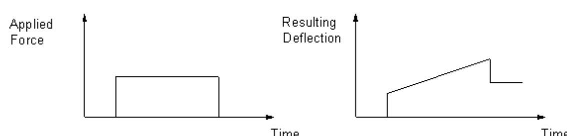


图 9-13 粘弹性行为（麦克斯韦模型）

可以利用单元 VISCO88 和 VISCO89 模拟小变形粘弹性，LINK180、SHELL181、PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186、SOLID187、BEAM188 和 BEAM189 模拟小变形或者大变形粘弹性。用户可以用 TB 命令族输入材料属性。对于单元 SHELL181、PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186 和 SOLID187，需用 MP 命令指定其粘弹性材料属性，用 TB，HYPER 指定其超弹性材料属性。弹性常数与快速载荷值有关。用 TB，PRONY 和 TB，SHIFT 命令输入松弛属性（可参考对 TB 命令的解释以获得更详细的信息）。

7. 粘塑性

粘塑性是一种跟时间相关的塑性现象，塑性应变的扩展跟加载速率有关，其基本应用是高温金属成型过程，例如滚动锻压，会产生很大的塑性变形，而弹性变形却非常小，如图 9-14 所示。因为塑性应变所占比例非常大（通常超过 50%），所以要求打开大变形选项[NLGEOM,ON]。可利用 VISCO106, VISCO107, 和 VISCO108 几种单元来模拟粘塑性。粘塑性是通过一套流动和强化准则将塑性和蠕变平均化，约束方程通常用于保证塑性区域的体积。

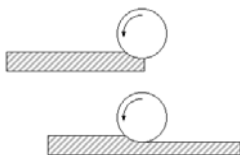


图 9-14 翻滚操作中的粘塑性行为

9.1.5 其他非线性问题

（1）屈曲：屈曲分析是一种用于确定结构的屈曲载荷（使结构开始变得不稳定的临界载荷）和屈曲模态（结构屈曲响应的特征形态）的技术。

（2）接触：接触问题分为两种基本类型：刚体/柔体的接触，半柔体/柔体的接触，都是高度非线性行为。

这两种非线性问题将在下两章单独讲述。

9.2 非线性分析的基本步骤

（1）前处理（建模和分网）。

（2）设置求解控制器。

（3）设置其他求解选项。

（4）加载。

（5）求解。

（6）后处理（观察模型）。

9.2.1 前处理（建模和分网）

虽然非线性分析可能包括特殊的单元或者非线性材料属性，但前处理这个步骤本质上跟线性分析是一样的。如果分析中包含大应变效应，那么应力-应变数据必须用真实应力和真实应变或者对数应变表示。

在前处理完成之后，需要设置求解控制器（分析类型、求解选项、载荷步选项等）、加载和求解。非线性分析不同于线性分析之处在于，它通常要求执行多载荷步增量和平衡迭代。

9.2.2 设置求解控制器

对于非线性分析来说，设置求解控制器包括跟线性分析同样的选项和访问路径（求解控制器对话框）。

选择如下 GUI 路径进入求解控制器：

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control，弹出“Solution Controls”对话框，如图 9-15 所示。

从图中可以看到，该对话框主要包括 5 大块：基本选项（Basic）、瞬态选项（Transient）、求解选项（Sol’n Options）、非线性选项（Nonlinear）和高级非线性选项（Advanced NL）。

结构静力分析章节已经提过的部分（例如设置求解控制、访问求解控制器对话框，利用基本选项、瞬态选项、求解选项、非线性选项和高级非线性选项等）在此略过，下面重点阐述前面没提到的选项及功能。

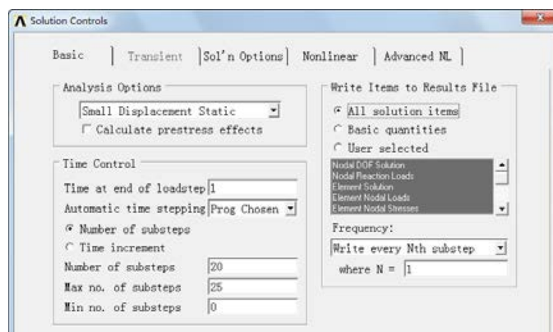


图 9-15 “Solution Controls”对话框

1. 设置求解器基本选项

（1）如果是开始一项新的分析，在设置分析类型和非线性选项时，选择“Large Displacement Static”（不过要记住不是所有的非线性分析都支持大变形）。

（2）在进行时间选项设置时，需记住这些可以在任何一个载荷步更改。

（3）非线性分析通常要求多子步或者时间步（这两者是等效的），这样来模拟载荷逐步的施加以获得比较精确的解。命令“NSUBST”和“DELTIM”是用不同的方法获得同样的效果。“NSUBST”指定一个载荷步内的子步数，而“DELTIM”则明确指定时间步长。如果自动时间步长[AUTOTS]是关闭的，那么整个载荷步都采用开始的步长。

（4）“OUTRES ”控制结果数据输出到结果文件（Jobname.RST），默认情况下，只会输出最后一个子步的数据。另外，默认情况下，ANSYS 允许最多输出 1000 个子步的结果，可以用命令“/CONFIG,NRES”来修改该限定。

2. 可以在求解控制器里设置的高级分析选项

多数情况下，ANSYS 会自动激活稀疏矩阵直接求解器（sparse direct solver）(EQSLV,SPARSE)，不过对于子结构分析，则默认激活波前直接求解器（frontal direct solver）。对于实体单元（例如 SOLID92 和 SOLID45），另外一种方程求解 PCG 求解器（预条件数共轭梯度迭代求解器）可能更快，特别是对于 3D 模型。

如果想利用 PCG 求解器，可以利用“MSAVE”命令降低内存使用率，但这只能针对线性分析。

稀疏矩阵求解器与迭代方法不同，是直接解法，功能非常强大。虽然“PCG”求解器可以求解不定方程，但当遇到病态矩阵时，该求解器会进行迭代直到最大迭代数，如

果还没收敛就会终止求解。而当稀疏矩阵求解器遇到这种情况时，会自动将步长减半，如果此时矩阵的条件数很好，则继续求解。最终可以求出整个非线性载荷步的解。

可以根据如下几条准则选择稀疏矩阵求解器和“PCG”求解器来进行非线性结构分析：

（1）对于包含梁或者壳的模型（有无实体单元均可），选用稀疏矩阵求解器。

（2）对于三维实体模型并且自由度数偏多（例如200，000或者更多），选择“PCG”求解器。

（3）如果矩阵方程的条件数很差，或者是模型不同区域的材料性质差别很大，或者是没有足够的约束条件，选择稀疏矩阵求解器。

3. 可以在求解器对话框设置的高级载荷步选项

（1）自动时间步。可利用命令“AUTOTS,ON”打开自动时间步长选项。自动调整时间步长能保证时间步既不冒进（时间步长过长）也不保守（时间步长过短）。在当前子步结束时，下一个子步的时间步长可以基于如下因子来预测：

最后一个时间步长的方程迭代数（方程迭代数越多时间步长越短）。

非线性单元状态改变的预测（在接近状态改变时减小时间步长）。

塑性应变增量。

蠕变应变增量。

（2）迭代收敛精度。在求解非线性问题时，ANSYS 程序会进行平衡迭代直到满足迭代精度[CNVTOL]或者是达到最大迭代数[NEQIT]。如果对默认设置不满意，可以对这两者进行设置。

例如：

```
CNVTOL,F,5000,0.0005,0。
CNVTOL,U,10,0.001,2。
```

（3）求解方程最大迭代步数。ANSYS 程序默认设置方程最大迭代步数[NEQIT]为15到26之间，其准则是缩短时间步长以减少迭代步数。

（4）预测校正选项。如果没有梁或者壳单元，默认情况下预测校正选项是打开的[PRED，ON]，如果当前子步的时间步长缩短很多，预测校正会自动关上。对于瞬态分析，预测校正也自动关上。

（5）线性搜索选项。默认时，ANSYS 程序会自动打开或者关闭线性搜索，对于多数接触问题，线性搜索自动打开[LNSRCH,ON]，对于多数非接触问题，线性搜索自动关上[LINSRCH,OFF]。

（6）后移准则。在时间步长里面，为了使步长减半或者后移的效果更好，可以利用命令[CUTCONTROL, Lab, VALUE, Option]。

9.2.3 设定其他求解选项

1．无法在求解控制器里设置的高级求解选项

（1）应力刚化（Stress Stiffness）。如果确信忽略应力刚化对结果影响不大，可以设置关掉应力刚化（SSTIF,OFF），否则应该打开。

命令：SSTIF。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options。

（2）牛顿-拉夫森选项（Newton-Raphson）。ANSYS 通常选择全牛顿-拉夫森方法，关掉自适应下降选项。但是，对于考虑摩擦的点-点接触、点-面接触单元通常需要打开自适应下降选项，例如单元 PIPE20, BEAM23, BEAM24, 和 PIPE60。

命令：NROPT。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options。

2．无法在求解控制器里设置的高级载荷步选项

（1）蠕变准则。如果机构有蠕变效应，可以对自动时间步长调整（如果自动时间步长调整[AUTOTS]是关掉的，该蠕变准则无效）指定蠕变准则[CRPLIM,*CRCR*, Option]。程序会计算蠕变应变增量跟弹性应变增量的比值，如果上一步的比值大于指定的蠕变准则 *CRCR*，程序会减小下一步的时间步长，如果小于蠕变准则，就加大时间步长。时间步长的调整还与方程迭代数、是否接近状态变化点和塑性应变增量有关。对于显示蠕变（Option = 0）,如果上述比值大于稳定界限 0.25 并且时间步长已经调整到最小，程序会终止求解并报错。这个问题可以通过设置足够小的最小时间步长[DELTIM 和 NSUBST]来解决。对于隐式蠕变（Option = 1），默认时没有最大蠕变界限，当然，可以如图 9-16 所示蠕变准则对话框来指定。

命令：CRPLIM。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Nonlinear > Creep Criterion。



如果在分析中不想考虑蠕变的影响，利用“RATE”命令设置“*Option* = OFF”，或者将时间步长设置大于前面所述，但不要大于 1.0e-6。

（2）时间步开放控制。时间步控制对话框如图 9-17 所示，该对话框对于热分析有效，方法如下：

命令：OPNCONTROL。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Nonlinear > Open Control。

（3）求解监控器。该选项可以方便地在指定节点的指定自由度上设置求解监视，方法如下：

命令：MONITOR。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Nonlinear > Monitor。

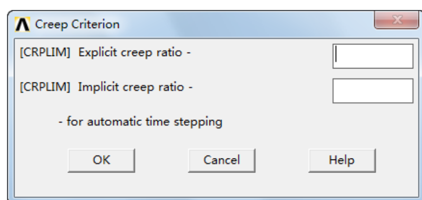


图 9-16 蠕变准则对话框

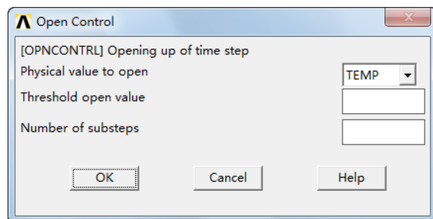


图 9-17 时间步控制对话框

（4）生与死。有时候，指定生与死选项是有必要的。可以杀死[EKILL]或者激活[EALIVE]指定的单元来模拟在结构中移除或者添加材料，当然，作为一种替换方法，也可以在不同载荷步里改变材料属性[MPCHG]。

（a）杀死或者激活单元：

命令：EKILL, EALIVE。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Kill Elements。

Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Birth & Death > Activate Elem。

（b）单元生与死的替换方法（修改材料属性）：

命令：MPCHG。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Change Mat Props > Change Mat Num。


慎用“MECHG”命令，在非线性分析中改变材料属性会导致意想不到的结果。

（5）输出控制

命令：OUTPR, ERESX。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout。

Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Output Ctrls > Integration Pt。

9.2.4 加载

此步骤跟结构静力分析一样。需要记住的是，惯性载荷和几种载荷的方向是固定的，而表面载荷在大变形里面会随着结构的变形而改变方向。另外，可以利用一维数组（TABLE）给结构定义边界条件。

9.2.5 求解

该步骤跟线性静力分析一样。如果需要定义多载荷步，必须对每一个载荷步指定时间设置、载荷步选项等，然后保存，然后选择多载荷步求解。

9.2.6 后处理

非线性静力分析的结果包括：位移、应力、应变和反作用力，可以通过 POST1（通用后处理器）和 POST26（时间历程后处理器）来观察这些结果。

POST1 在一个时刻只能读取一个子步的结果数据，并且这些数据必须已经写入“Jobname.RST”文件。

1. 要点

（1）数据库必须跟求解时使用的是同一个模型。

（2）结果文件（Jobname.RST)须存在且有效。

2. 利用 POST1 作后处理

（1）进入后处理器：

命令：/POST1。

GUI：Main Menu > General Postproc。

（2）读取子步结果数据：

命令：SET。

GUI：Main Menu > General Postproc > Read Results > load step。

如果指定的时刻没有结果数据，ANSYS 程序会按线性插值计算该时刻的结果，在非线性分析里面，这种线性插值可能会丧失部分精度，如图 9-18 所示。所以，在非线性分析里面，建议对真实求解时间点作后处理。

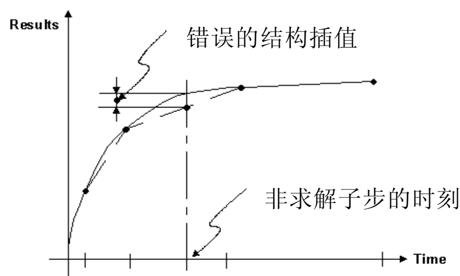


图 9-18 非线性结果的线性插值可能丧失部分精度

（3）显示变形图：

命令：PLDISP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

（4）显示变形云图：

命令：PLNSOL or PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu or Element Solu。

（5）利用单元表格：

命令：PLETAB, PLLS。

GUI：Main Menu > General Postproc > Element Table > Plot Element Table。

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res。

（6）列表显示结果：

命令：PRNSOL（节点结果）。

PRESOL（单元结果）。

PRRSOL（反作用力）。

PRETAB。

PRITER（子步迭代数据）。

NSORT。

ESORT。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution。

（7）其他通用后处理。将结果映射到路径等，可参考 ANSYS 帮助。

3. 利用 POST26 作后处理

通过 POST26 可以观察整个时间历程上的结果，典型的 POST26 后处理步骤如下：

（1）进入时间历程后处理器：

命令：/POST26

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro

（2）定义变量：

命令：NSOL, ESOL, RFORCE

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

（3）绘图或者列表显示变量：

命令：PLVAR (graph variables)。

PRVAR。

EXTREM (list variables)。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Graph Variables。

Main Menu > TimeHist Postpro > List Variables。

Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes。

（4）其他功能。时间历程后处理还有很多其他的功能，在此不在赘述，可参阅前面章节或帮助文档。

9.3 实例导航——螺栓的蠕变分析

在该例中，通过一个螺栓的蠕变分析实例，详细介绍蠕变分析的过程和技巧。另外，

本文是直接通过结点和单元建立有限元模型。

9.3.1 问题描述

如图 9-19 所示，一个长为l，界面积为A的螺栓，受到预应力σ_o的作用。该螺栓在高温T_0下放置一段很长的时间t_1。螺栓的材料有蠕变效应，其蠕变应变率为$d\varepsilon/dt = k\sigma^n$，见表 9-1。下面求解在这个应力松弛的过程中螺栓的应力σ。

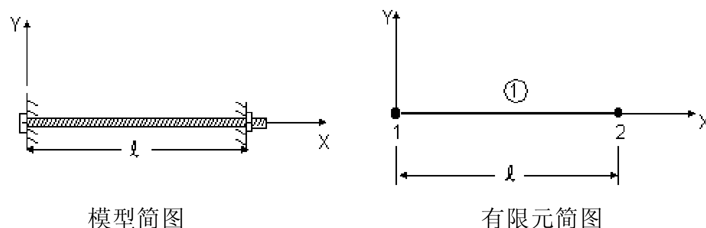


图 9-19 结构简图

表 9-1 材料性质、几何尺寸以及载荷情况

材料属性	几何尺寸	载荷
$E = 30 \times 10^6$ psi	L= 10 in	σ_o = 1000 psi
n = 7	$A = 1$ in^2	T_o = 900°F
$k = 4.8 \times 10^{-30}$/hr		t_1 = 1000 hr

9.3.2 GUI 路径模式

01 前处理。

❶定义工作标题：Utility Menu > File > ChangeTitle，输入文字“STRESS RELAXATION OF A BOLT DUE TO CREEP”，单击“OK”按钮，如图 9-20 所示。

❷定义单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > All/Edit/Delete，出现“Element Types”对话框，单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，如图 9-21 所示，在左边的列表中单击“Structural Link”，在右边的列表中单击“3D finit stn 180”选项，单击“OK”按钮。单击“Element Types”对话框的“OK”按钮，关闭该对话框，最后单击“Close”按钮关闭“Element Types”对话框。

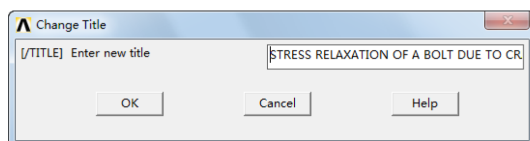


图 9-20 设定工作标题

❸定义实常数：Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，弹出

“Real Constants”对话框，单击“Add”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框。单击“OK”按钮，弹出如图 9-22 所示的“Real Constants Set Number 2，for LINK180”对话框，在“Cross－sectional area AREA”后面输入 1，在“Added Mass(Mass/Lenth)ADDMAS”后面输入 1/30000，单击“OK”按钮。最后单击“Real Constants”对话框的“Close”按钮，关闭该对话框。

❹定义线性材料性质：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出如图 9-23 所示的“Define Material Model Behavior”对话框，在“Material Models Available”栏目中连续单击 Favorites > Linear Static > Linear Isotropic，弹出如图 9-24 所示的“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“EX”后键入“3E+007”，单击“OK”按钮。

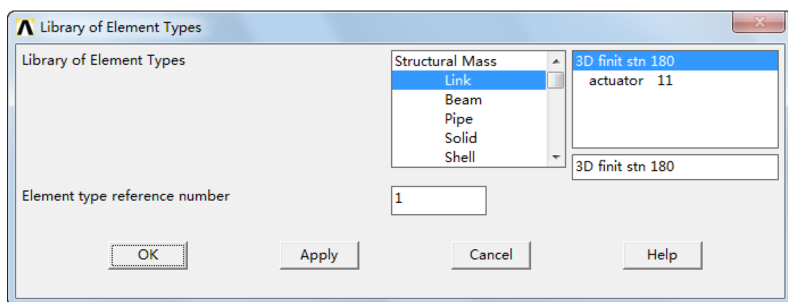


图 9-21 单元类型选择对话框

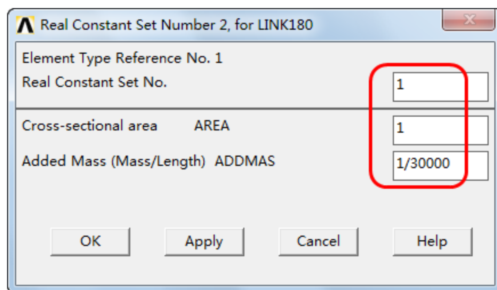


图 9-22 定义 LINK1 的实常数

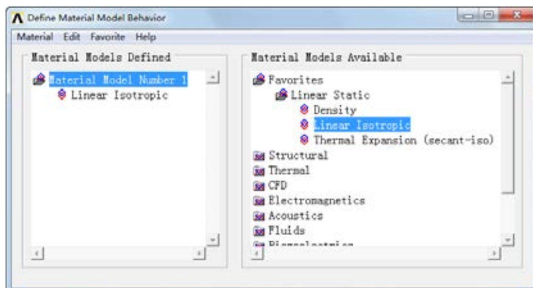


图 9-23 材料定义框

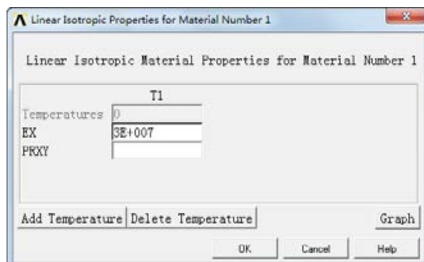


图 9-24 定义线弹性材料属性

❺定义蠕变材料性质：在 Material Models Available 栏目中连续单击 Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate Dependent > Creep > With Swelling > Explicit，如图 9-25 所示，弹出如图 9-26 所示的“Creep Table for Material Number 1”对话框，在左上角第一项输入“4.8E-30”，第二项输入 7，单击“OK”按钮。最后在“Define Material Model Behavior”对话框中，选择菜单路径 Material > Exit，退出材料定义窗口。

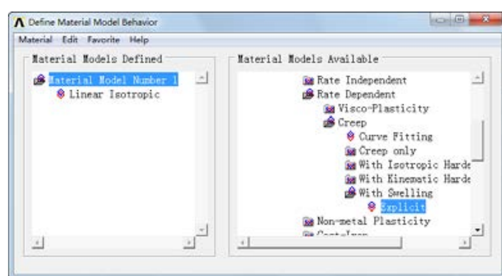


图 9-25 定义蠕变材料属性的路径

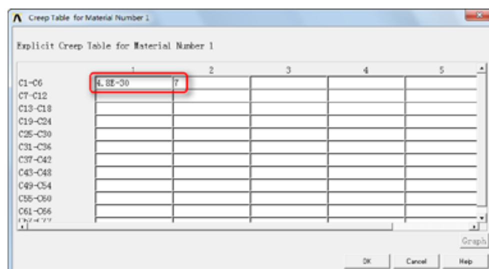


图 9-26 定义蠕变材料属性

❻定义节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Node > In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框，如图 9-27 所示，在“NODE Node number”后面输入 1，单击“Apply”按钮，继续在“NODE Node number”后面输入 2，在“X，Y，Z Location in active CS”后面依次输入“10，0，0”，单击“OK”按钮。

❼定义单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，弹出“Elements form Nodes”拾取菜单，用鼠标在屏幕上单击

拾取刚建立的两个节点，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 9-28 所示。

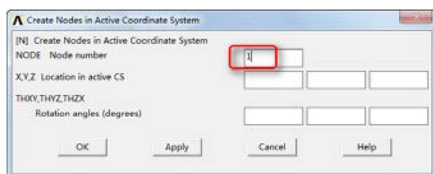


图 9-27 “Triangular Area”对话框

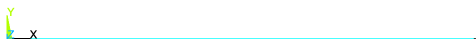


图 9-28 模型简图

02 设置求解控制器。

❶设定分析类型：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，如图 9-29 所示，单击“OK”按钮接受默认设置（Static）。

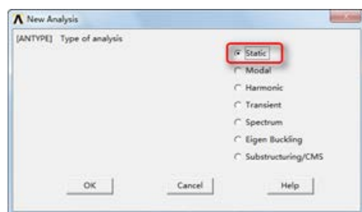


图 9-29 设置分析类型

❷设定分析选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol’s Controls，弹出如图 9-30 所示的“Solution Controls”对话框，在“Time at end of loadsteps”后面输入 1000，在“Automatic time stepping”下拉列表中选择“Off”，选中“Number of substeps”单选按钮，在“Number of substeps”文本框中输入 100，在“Frequency”的下拉列表中选择“Write every substep”，单击“OK”按钮。

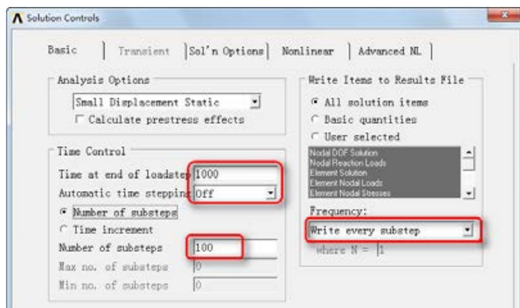


图 9-30 “Solution Controls”对话框

03 设置其他求解选项。

❶关闭优化选项：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Solution Ctrl，弹出

“Nonlinear Solution Control”对话框，如图 9-31 所示，在“[SOLCONTROL] Solution Control”后面选择“Off”（通常它是默认选项），单击“OK”按钮。



如果在 Main Menu > Solution > Load Step Opts 下没有找到 Solution Ctrl 菜单，可以单击菜单路径：Main Menu > Solution > Unabridged menu。

❷设置载荷形式为阶跃载荷：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps，弹出“Time and Substep Options”对话框，如图 9-32 所示，在“[KBC] Stepped or ramped b.c.” 后面选择“Stepped”，其他选项保持不变，然后单击“OK”按钮。

04 加载和求解。

❶设置环境温度：Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Uniform TEMP，弹出“Uniform Temperature”对话框，如图 9-33 所示，在文本框中输入 900，单击“OK”按钮。

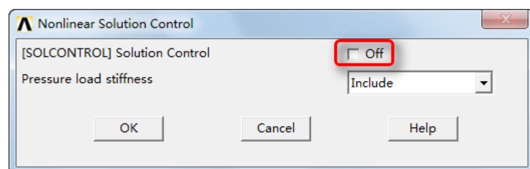


图 9-31 “Nonlinear Solution Control”对话框

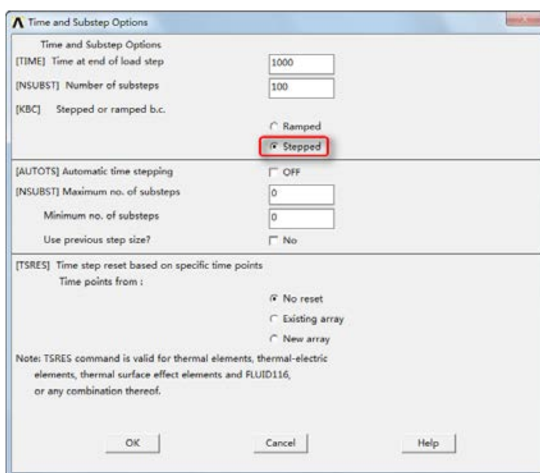


图 9-32 “Time and Substep Options”对话框

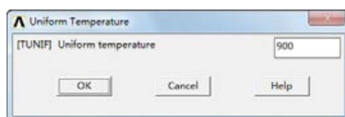


图 9-33 Uniform Temperature 对话框

❷施加位移约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Dispacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单，单击“Pick All”按钮，弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框，如图 9-34 所示，选择“ALL DOF”，单击“OK”按钮。

❸求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示窗口和“Solve Current Load Step”对话框。仔细浏览信息提示窗口中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“OK”按钮开始求解。当屈曲求解结束时，屏幕上会弹出“Solution is done”提示框，单击“Close”关闭它，此时屏幕显示求解追踪曲线，如图 9-35 所示。

❹退出求解器：Main Menu > Finish。

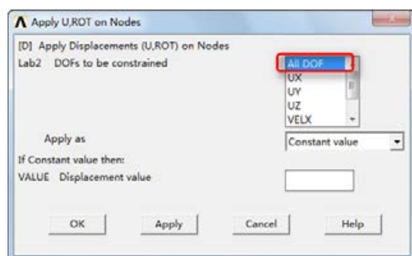


图 9-34 “Apply U,ROT on Nodes”对话框

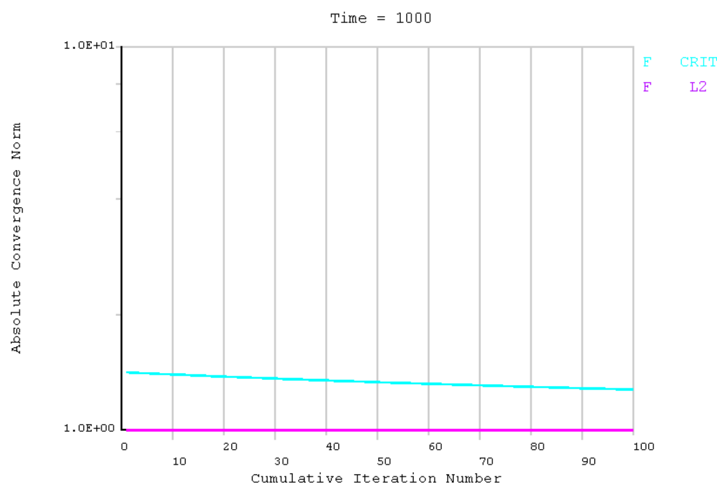


图 9-35 蠕变求解追踪曲线

05 后处理。

❶进入时间历程后处理：Main Menu > TimeHist PostPro，弹出如图 9-36 所示的“Time History Variables-Grain.rst”对话框，里面已有默认变量时间（TIME）。

❷定义单元应力变量：在图 9-36 所示的对话框中单击左上角的＋按钮，弹出“Add Time-History Variable”对话框，如图 9-37 所示。

❸在图 9-37 所示对话框中单击 Element Solution > Miscellaneous Items > Line stress

（LS，1），弹出“Miscellaneous Sequence Number”对话框，如图 9-38 所示。在“Sequence number LS”后面输入 1，单击“OK”按钮。

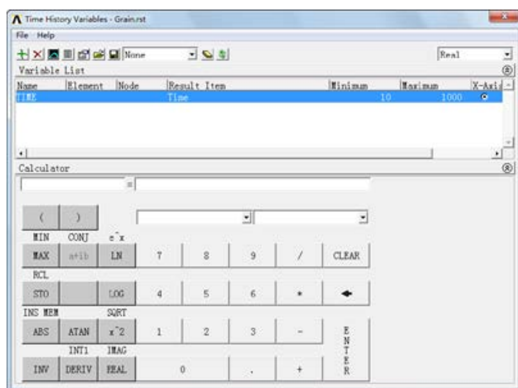


图 9-36 “Time History Variables - Grain.rst”对话框（1）

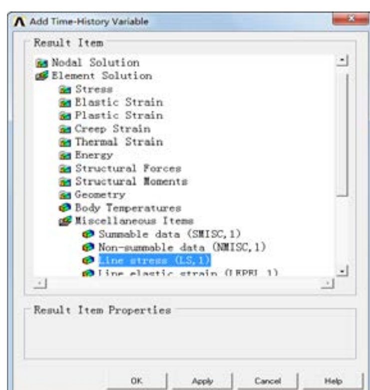


图 9-37 “Add Time-History Variable”对话框

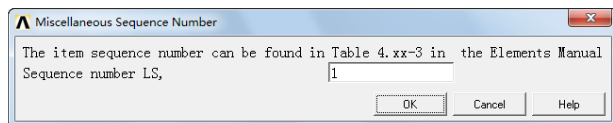


图 9-38 “Miscellaneous Sequence Number”对话框

❹返回到图 9-37 所示的对话框，在“Variable Name”文本框中输入“SIG”，单击“OK”按钮。弹出“Element for Data”拾取框，然后鼠标拾取此单元，单击“OK”按钮，又弹出“Node for Data”拾取框，鼠标拾取左面的节点，然后单击“OK”按钮。返回到“Time History Variables-Grain.rst”对话框，如图 9-39 所示。此时变量列表里面多了一项 SIG 变量。

❺绘制变量曲线（以时间 TIME 为横坐标，以自定义的单元应力变量 SIG 为纵坐标）：在图 9-39 所示的对话框中单击左上角的第三个按钮，屏幕显示如图 9-40 所示。

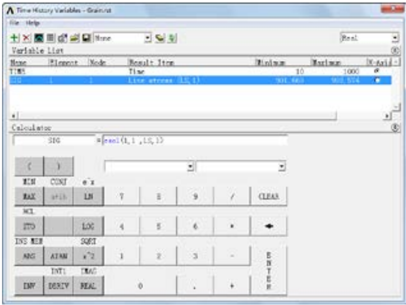


图 9-39 “Time History Variables - Grain.rst”对话框（2）

❻列表显示变量随时间的变化：在图 9-39 所示的对话框中单击左上角的第四个按钮，屏幕显示如图 9-41 所示。

❼退出 ANSYS 程序：单击 ANSYS 程序窗口左上角的“QUIT”按钮，选择想保存的项，然后退出。

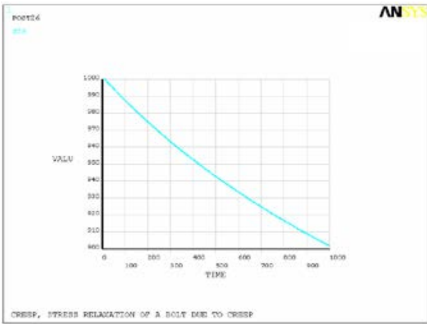


图 9-40 变量时间曲线

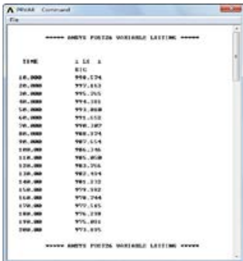


图 9-41 变量随时间变化值

9.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 10 章

模态分析

模态分析是所有动力学分析类型的最基础内容。本章介绍了 ANSYS 模态分析的全流程步骤，详细讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过齿轮模态分析实例对 ANSYS 模态分析功能进行了具体演示。

通过本章的学习，读者可以完整深入地掌握 ANSYS 模态分析的各种功能和应用方法。

学习要点

- 模态分析概论
- 模态分析的基本步骤
- 压电变换器的自振频率分析

10.1 模态分析概论

模态分析是用来确定结构的振动特性的一种技术，通过它可以确定自然频率、振型和振型参与系数（即在特定方向上某个振型在多大程度上参与了振动）。

进行模态分析有许多好处：可以使结构设计避免共振或以特定频率进行振动（例如扬声器）；使工程师认识到结构对于不同类型的动力载荷是如何响应的；有助于在其他动力分析中估算求解控制参数（如时间步长）。由于结构的振动特性决定结构对于各种动力载荷的响应情况，所以在准备进行其他动力分析之前首先要进行模态分析。

使用 ANSYS 的模态分析来决定一个结构或者机器部件的振动频率（固有频率和振形）。模态分析也可以是另一个动力学分析的出发点，例如，瞬态动力学分析，谐响应分析或者谱分析等。

用模态分析可以确定一个结构的固有频率和振型。固有频率和振型是承受动态载荷结构设计中的重要参数。如果要进行模态叠加法谐响应分析或瞬态动力学分析，固有频率和振型也是必要的。

可以对有预应力的结构进行模态分析，例如旋转的涡轮叶片。另一个有用的分析功能是循环对称结构模态分析，该功能允许通过只对循环对称结构的一部分进行建模而分析产生整个结构的振型。

ANSYS 产品家族的模态分析是线性分析。任何非线性特性，如塑性和接触（间隙）单元，即使定义了也将被忽略。可选的模态提取方法有 6 种：Block Lanczos (默认)，subspace，PowerDynamics，reduced，unsymmetric，damped, QR damped。Damped 和 QR damped 方法允许结构中包含阻尼。

10.2 模态分析的基本步骤

10.2.1 建模

在这一步中要指定项目名和分析标题，然后用前处理器 PREP7 定义单元类型，单元实常数，材料性质以及几何模型。这些工作对大多数分析是相似的，在此不再详细介绍。

需要记住的要点：

（1）模态分析中只有线性行为是有效的，如果指定了非线性单元，他们将被认为是线性的。例如，如果分析中包含了接触单元，则系统取其初始状态的刚度值并且不再改变此刚度值。

（2）必须指定弹性模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质量）。材料性质可以是线性的或非线性的，各向同性或正交各向异性的，恒定的或与温度有关的，非线性特性将被忽略。必须对某些指定的单元（COMBIN7，COMBIN14，

COMBIN37）进行实常数的定义。

10.2.2 加载及求解

在这一步中要定义分析类型和分析选项，施加载荷，指定加载阶段选项，并进行固有频率的有限元求解，在得到初始解后，应该对模态进行扩展以供查看。扩展模态在下一步的“扩展模态”中详细介绍。

1．进入 ANSYS 求解器

命令：/SOLU。

GUI：Main Menu > Solution。

2．指定分析类型和分析选项

ANSYS 提供的用于模态分析的选项如表 10-1 所示。

表 10-1 分析类型和分析选项

选项	命令	GUI 路径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis
Analysis Type: Modal (see Note below)	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Modal
Mode Extraction Method	MODOPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
Number of Modes to Extract	MODOPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
No. of Modes to Expand (see Note below)	MXPAND	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
Mass Matrix Formulation	LUMPM	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
Prestress Effects Calculation	PSTRES	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

（1）New Analysis [ANTYPE]：选择新的分析类型。

（2）Analysis Type: Modal [ANTYPE]：用此选项指定分析类型为模态分析。

（3）Mode Extraction Method [MODOPT]：可以选择不同的的模态提取方法，其对应菜单如图 10-1 所示。

（4）Number of Modes to Extract [MODOPT]：指定模态提取的阶数。



除了“Reduced”法，其他所有的模态提取方法都必须设置具体的模态提取的阶数。

（5）Number of Modes to Expand [MXPAND]：此选项只在采用“Reduced”法，Unsymmetric 法和 Damped 法时要求设置。但如果想得到单元的求解结果，则不论采用何种模态提取方法都需打开“Calculate elem results”项。

（6）Mass Matrix Formulation [LUMPM]：使用该选项可以选定采用默认的质量矩阵形成方式（和单元类型有关）或者集中质量阵近似方式。建议在大多数情况下应采用默认形成方式。但对有些包含“薄膜”结构的问题，如细长梁或非常薄的壳，采用集中质

量矩阵近似经常产生较好的结果。另外，采用集中质量阵求解时间短，需要内存少。

（7）Prestress Effects Calculation [PSTRES]：选用该选项可以计算有预应力结构的模态。默认的分析过程不包括预应力，即结构是处于无应力状态的。

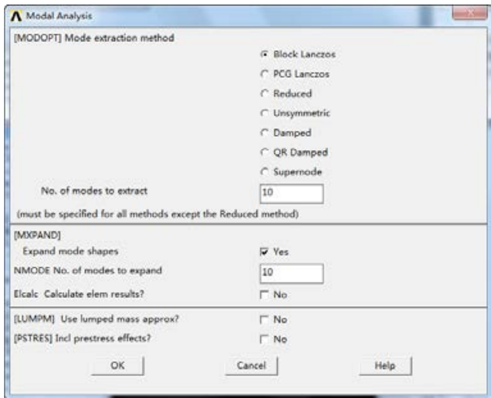


图 10-1 模态分析选项

（8）其他模态分析选项：完成了模态分析选项（Modal Analysis Option）对话框中的选择后，单击“OK”按钮。一个相应于指定的模态提取方法的对话框将会出现，以选择兰索斯模态提取法（Block Lanczos）为例，将弹出“Block Lanczos Method”对话框，如图 10-2 所示，其中“FREQB Start Freq（initial shift）”对应项表示需要提取模态的最小频率，“FREQE End Frequency”对应项表示需要提取模态的最大频率，一般按默认选项即可（即：不设定最小和最大频率）。

3．定义主自由度

只有采用 Reduced 模态提取法时需要定义。主自由度（MDOF）是结构动力学行为的特征自由度，主自由度的个数至少要是所关心模态数的两倍，这里推荐读者根据自己对结构动力学特性的了解尽可能地多定义主自由度[命令：M,MGEN]，并且允许 ANSYS 软件根据结构刚度与质量的比值定义一些额外的主自由度[命令：TOTAL]。读者可以列表显示定义的主自由度[命令：MLIST]，也可以删除无关的主自由度[命令：MDELE]，参考 ANSYS 在线帮助的相关章节可获得更详细的说明。

命令：M。

GUI：Main Menu > Solution > Master DOFs > user Selected > Define。

4．在模型上加载荷

在典型的模态分析中唯一有效的“载荷”是零位移约束。如果在某个 DOF 处指定了一个非零位移约束，程序将以零位移约束替代该 DOF 处的设置。可以施加除位移约束之外的其他载荷，但它们将被忽略（见下面的说明）。在未加约束的方向上，程序将解算刚体运动（零频）以及高频（非零频）自由体模态。表 10-2 给出了施加位移约束的命令和 GUI 路径。载荷可以加在实体模型（点，线，面）上或加在有限元模型（点和单元）上。

注意 其他类型的载荷（力，压力，温度，加速度等）可以在模态分析中指定，

但模态提取时将被忽略。程序会计算出相应于所有载荷的载荷矢量，并将这些矢量写到振型文件 Jobname.MODE 中，以便在模态叠加法谐响应分析或瞬态分析中使用。在分析过程中，可以增加，删除载荷或进行载荷列表，载荷间运算。

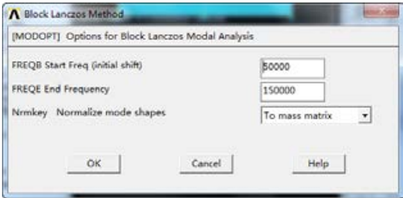


图 10-2 兰索斯（Block Lanczos）模态提取法选项

表 10-2 施加位移载荷约束

载荷类型	命令	GUI 路径
Displacement（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ)	D	Main Menu > Solution > DefineLoads > Apply > Structural > Displacement

5．指定载荷步选项

模态分析中可用的载荷步选项如表 10-3 所示，表中左边第一列相应说明了各选项的用途。

表 10-3 载荷步选项

选项	命令	GUI 路径
Alpha（质量）阻尼	ALPHAD	Main Menu > Solution > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Damping
Beta（刚度）阻尼	BETAD	Main Menu > Solution > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Damping
恒定阻尼比	DMPRAT	Main Menu > Solution > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Damping
材料阻尼比	MP，DAMP	Main Menu > Solution > LoadStepOpts > Other > Change Mat Props > Polynomial
单元阻尼比	R	MainMenu > Solution > LoadStepOpts > Other > RealConstants > Add/Edit/Delete
输出	OUTPR	Main Menu > Solution > Load StepOpts > Output Ctrls > Solu Printout



阻尼只在用“Damped”模态提取法时有效（在其他模态提取法中阻尼将被忽略）。如果包含阻尼，且采用“Damped”模态提取法，则计算的特征值是复数解。

6．开始求解计算

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

7．离开 SOLUTION

命令：FINISH。

GUI：Main Menu > Finish。

10.2.3 扩展模态

从严格意义上来说，“扩展”这个词意味着将减缩解扩展到完整的 DOF 集上。“减缩解”常用主 DOF 表达。而在模态分析中，我们用“扩展”这个词指将振型写入结果文件。也就是说，“扩展模态”不仅适用于“Reduced”模态提取方法得到的减缩振型，而且也适用于其他模态提取方法得到的完整振型。因此，如果想在后处理器中查看振型，必须先对其扩展（也就是将振型写入结果文件）。



模态扩展要求振型文件 Jobname.MODE，文件 Jobname.EMAT，Jobname.ESAV，及 Jobname.TRI（如果采用 Reduced 法）必须存在；数据库中必须包含与计算模态时完全相同的分析模型。

扩展模态的具体操作步骤如下：

1．进入 ANSYS 求解器

命令：/SOLU。

GUI：Main Menu > Solution。



在扩展处理前必须明确地离开“SOLUTION”（用命令 FINISH 和相应 GUI 路径）并重新进入(/SOLU)。

2．激活扩展处理及相关选项

ANSYS 提供的扩展处理选项如表 10-4 所示。

表 10-4 扩展处理选项

选项	命令	GUI 路径
Expansion Pass On/Off	EXPASS	Main Menu > Solution > Analysis Type > Expansion Pass
No. of Modes to Expand	MXPAND	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Expansion Pass > Single Expand > Expand Modes
Freq. Range for Expansion	MXPAND	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Expansion Pass > Single Expand > Expand Modes
Stress Calc. On/Off	MXPAND	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Expansion Pass > Single Expand > Expand Modes

（1）Expansion Pass On/Off [EXPASS]：选择 ON（打开）。

（2）No. of Modes to Expand [MXPAND]：指定要扩展的模态数，默认为不进行模态扩展，其对应的对话框如图 10-3 所示。



只有经过扩展的模态才可在后处理中进行观察。

（3）Fre Range for Expansion [MXPAND]：这是另一种控制要扩展模态数的方法。如果指定了一个频率范围，那么只有该频率范围内的模态会被扩展。

（4）Stress Calc On/Off [MXPAND]：是否计算应力选项，默认为不计算。

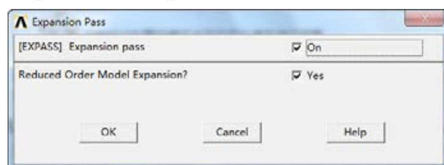


图 10-3 扩展模态选项

3．指定载荷步选项

模态扩展处理中唯一有效的选项是输出控制：

（1）Printed Output

命令：OUTPR。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout。

（2）Database and results file output 此选项用来控制结果文件 Jobname.RST 中包含的数据。OUTRES 中的 FREQ 域只可为 ALL 或 NONE：即要么输出所有模态要么不输出任何模态的数据。比如，不能输出每隔一阶的模态信息。

命令：OUTRES。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File。

4．开始扩展处理

扩展处理的输出包括已扩展的振型，而且还可以要求包含各阶模态相对应的应力分布。

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Current LS。

5．重复扩展处理

如需扩展另外的模态（如不同频率范围的模态）请重复步骤 2、3 和 4。每一次扩展处理的结果文件中存储为单步的载荷步。

6．离开 SOLUTION，

命令：FINISH。

GUI：Main Menu > Finish。

10.2.4 观察结果和后处理

模态分析的结果（即扩展模态处理的结果）被写入到结构分析结果文件 Jobname.RST 中。分析包括：

- 固有频率
- 已扩展的振型
- 相对应力和力分布（如果要求输出了）

可以在 POST1 [/POST1] 即普通后处理器中观察模态分析结果。模态分析的一些常用后处理操作将在下面予以描述。



如果在 POST1 中观察结果，则数据库中必须包含和求解相同的模型；结果文件 Jobname.RST 必须存在。

观察结果数据包括：

（1）读入合适子步的结果数据。每阶模态在结果文件中被存为一个单独的子步。比如扩展了 6 阶模态，结果文件中将有 6 个子步组成的一个载荷步。

命令：SET，SUBSTEP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Load Step > Substep。

（2）执行任何想做的 POST1 操作，常用的模态分析 POST1 操作如下：

Listing All Frequencies：用于列出所有已扩展模态对应的频率。

命令：SET，LIST。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Detailed Summary。

命令：PLDISP。

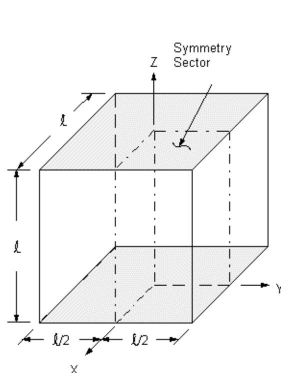
GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

10.3 实例导航——压电变换器的自振频率分析

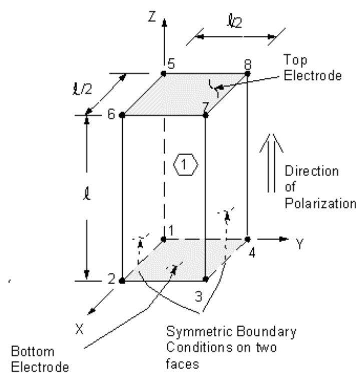
10.3.1 问题描述

如图 10-4 所示，压电变换器由 PZT4 材料组成的一立方体构成，其极性方向沿 Z 轴。正交于极性轴的两个平行的平面为电极。求压电变换器短路电路和公开电路的第一、第二模态的自振频率。材料特性及尺寸如下：

密度：ρ=7500 kg/m^3，尺寸：L＝0.02m



PZT4 立方体



压电变换器实体模型

图 10-4 压电变换器示意图

PZT4 材料的介电常数矩阵[ε_r]：$\begin{pmatrix} 804.6 & 0 & 0 \\ 0 & 804.6 & 0 \\ 0 & 0 & 659.7 \end{pmatrix}$

PZT4 材料的压电常数矩阵[e] C/m^2：$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

PZT4 材料的刚度矩阵[c]×10^{10} N/m^2：$\begin{pmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{pmatrix}$

10.3.2 GUI模式

01 建立模型。

❶定义工作文件名：Utility Menu > File > Change Jobname，弹出如图 10-5 所示的“ChangeJobname”对话框，在“Enter new jobname”文本框中输入“PZT”，并将“New log and error files”复选框选为“Yes”，单击“OK”按钮。

❷定义工作标题：Utility Menu > File > Change Title，在出现的对话框中输入“NATURAL FREQUENCY OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER”，如图 10-6 所示，单击“OK”按钮。

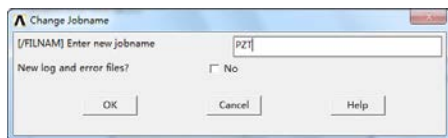


图 10-5 Change Jobname 对话框

❸关闭三角坐标符号：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window options，弹出如图 10-7 所示的“Window Options”对话框，在“Location of triad”下拉列表框中，选择“Not shown”，单击“OK”按钮。

❹选择单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，弹出如图 10-8 所示的“Element Types”对话框，单击“Add”按钮，又弹出如图 10-9 所示的“Library of Element Types”对话框，在列表框中分别选择“Coupled Field”和“Scalar Brick 5”，单击“OK”按钮。然后单击图 10-8 的“Close”按钮关闭该对话框。

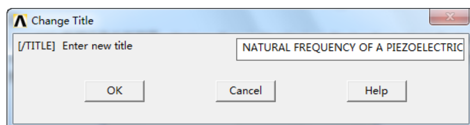


图 10-6 Change Title 对话框

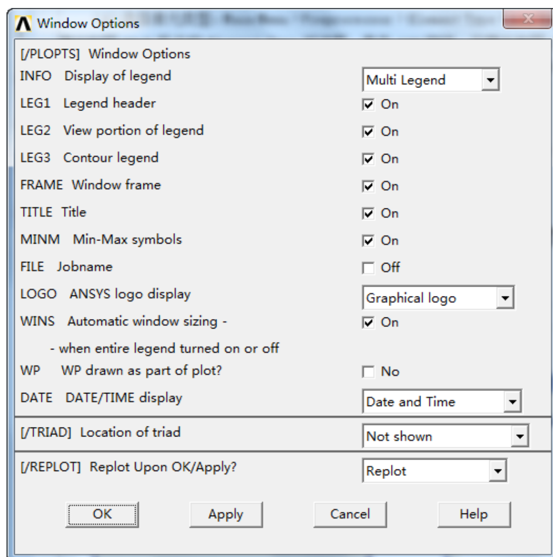


图 10-7 “Window Options”对话框

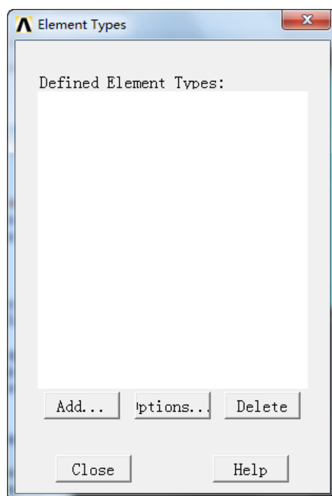


图 10-8 “Element Type”对话框

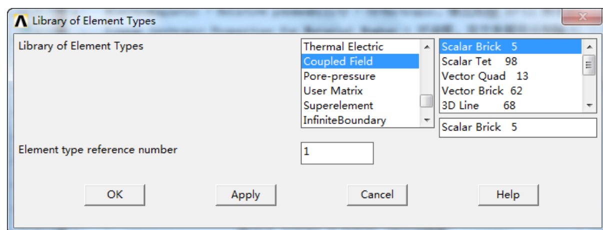


图 10-9 “Library of Element Types”对话框

❺设置材料密度：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出如图 10-10 所示的“Define Material Model Behavior”对话框，在“Material Model Available”下拉列表框中，双击打开 Structural > Favorites > Linear Static > Density，又弹出如图 10-11 所示的“Density for Material Number3”对话框，在“DENS”文本框中输入 7500，单击“OK”按钮。

❻设置材料介电常数：在 Material Model Available 下面的选择栏中，双击 Electromagnetic > Relative permeability > Orthotropic，弹出如图 10-12 所示的“Relative Permittivility for Material Number3”对话框，在文本框中分别输入 804.6、804.6 和 659.7，单击“OK”按钮。

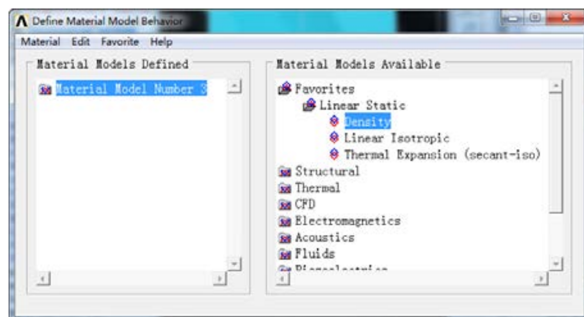


图 10-10 “Define Material Model Behavior”对话框

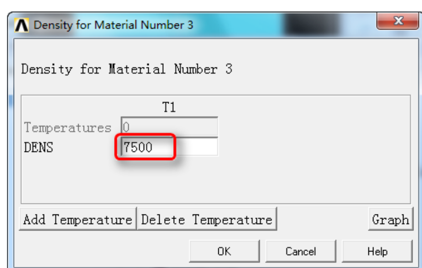


图 10-11 “Linear Isotropic Properties for Material Number3“对话框

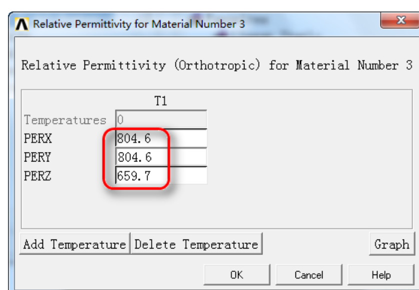


图 10-12 “Relative Permittivility for Material Number3”对话框

❼设置压电常数：在如图 10-10 所示的“Define Material Model Behavior”对话框中，双击选择“Material Models Available”下的 Piezoelectrics > Piezoelectric Matrix，弹出如图 10-13 所示的“Piezoelectric Matrix for Material Number3”对话框，在文本框中依次输入压电矩阵数据，如图 10-13 所示，单击“OK”按钮。

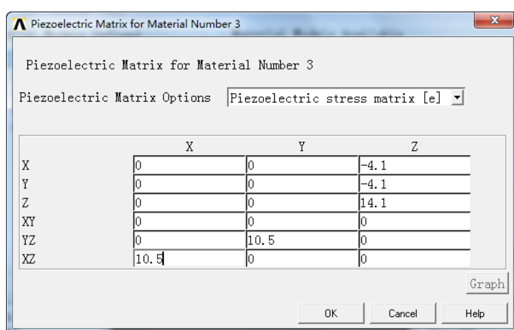


图 10-13 “Piezoelectric Matrix for Material Number3”对话框

❽设置刚度矩阵：在如图 10-10 所示的对话框中，双击选择“Material Models Available”下的 Structural > Linear > Elastic > Anisotropic，弹出如图 10-14 所示的“Anisotropic Elasticity for Material Number3”对话框，在文本框中输入刚度矩阵数据，如图 10-14 所示，单击“OK”按钮。然后单击“Define Material Model Behavior”对话框中的菜单选项 Material > Exit，退出材料属性的设置。

⑨定义参数的初始值：Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters 命令，弹出如图 10-15 所示的“Scalar Parameters”对话框，在“Selection”文本框中输入 L=10E-3，单击“Accept”按钮；W=10E-3，单击“Accept”按钮；h=20E-3，单击“Accept”按钮；A3=1000，单击“Accept”按钮，参数将在菜单中显示。然后单击图 10-15 的“Close”按钮关闭对话框。

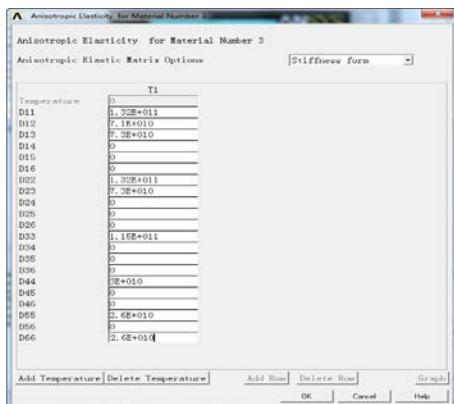


图 10-14 “Anisotropic Elasticity for Material Number3”对话框

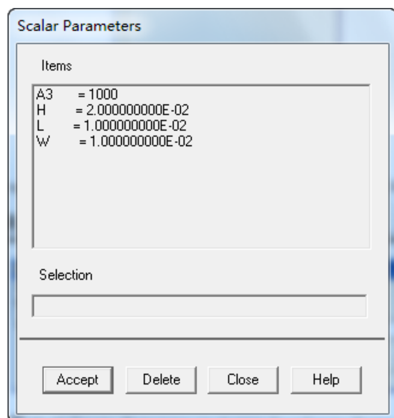


图 10-15 “Scalar Parameters”对话框

⑩创建 4 个关键点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS，弹出如图 10-16 所示的“Create Keypoints in Active Coordiante System”对话框，在“Keypoint number”文本框中输入 1，单击“Apply”按钮，又弹出此对话框，在“Keypoint number”文本框中输入 2，在“X，Y，Z Location in active CS”文本框中分别输入“L、0、0”，单击“Apply”按钮，又弹出此对话框；在“Keypoint number”文本框中输入 3，在“X，Y，Z Location in active CS”文本框中分别输入“L、W、0”，单击“Apply”按钮，再次弹出此对话框；在“Keypoint number”文本框中输入 4，在“X，Y，Z Location in active CS”文本框分别输入“0、W、0”，单击“OK”按钮。

执行 Main Menu > PlotCtrls > Pan Zoom Rotate，弹出“Pan-Zoom-Rotate”对话框，单击“Iso”按钮，然后单击“Close”按钮关闭该对话框。

生成的结果如图 10-17 所示。

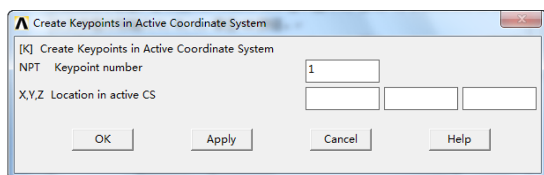


图 10-16 “Create Keypoints in Active Coordiante System”对话框

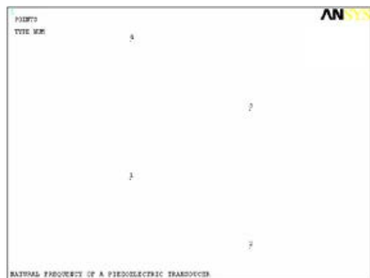


图 10-17 生成的结果显示

⑪复制其他关键点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Keypoints，弹出

一个拾取框，单击“Pick All”按钮，又弹出如图 10-18 所示的“Copy Keypoints”对话框，在“ITIME Number of copies”文本框中输入 2，在“Z-offset in active CS”文本框中输入“H”，单击“OK”按钮，结果生成如图 10-19 所示的图形。

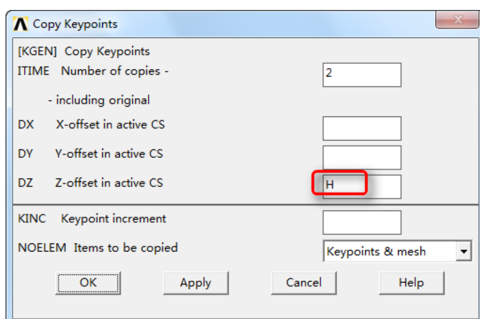


图 10-18 “Copy Keypoints”对话框

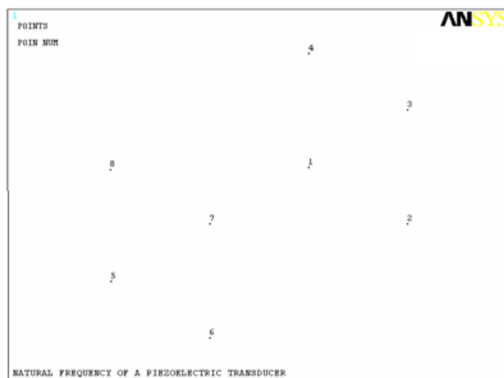


图 10-19 关键点生成图形显示

⓬连接关键点生成直线：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Straight Line，弹出一个拾取框，在工作平面上拾取编号为 1 和 5 的关键点，单击“OK”按钮。

⓭设置线单元尺寸：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > All Lines，弹出如图 10-20 所示的“Element Sizes on All Selected Lines”对话框，在“NDIV No. of element divisions”文本框中输入 4，单击“OK”按钮。

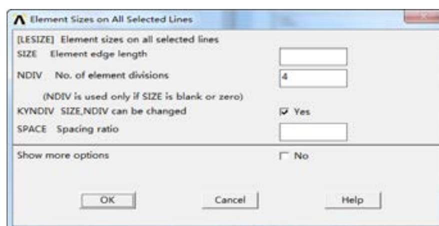


图 10-20 “Element Sizes on All Selected Lines”对话框

⓮设置全局单元尺寸：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size，弹出如图 10-21 所示的“Global Element Sizes”对话框，在“NDIV No. of element divisions”文本框中输入 2，单击“OK”按钮。

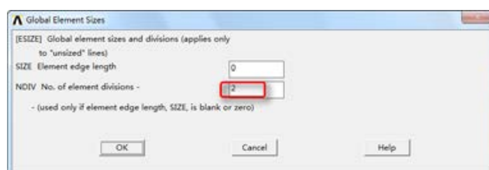


图 10-21 “Global Element Sizes”对话框

⑮设置单元划分类型：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesher Opts，弹出如图 10-22 所示的"Mesher Options"对话框，在"KEY Mesher Type"单选项中选中"Mapped"，单击"OK"按钮，又弹出如图 10-23 所示的"Set Element Shape"对话框，不用改变设置，单击"OK"按钮。

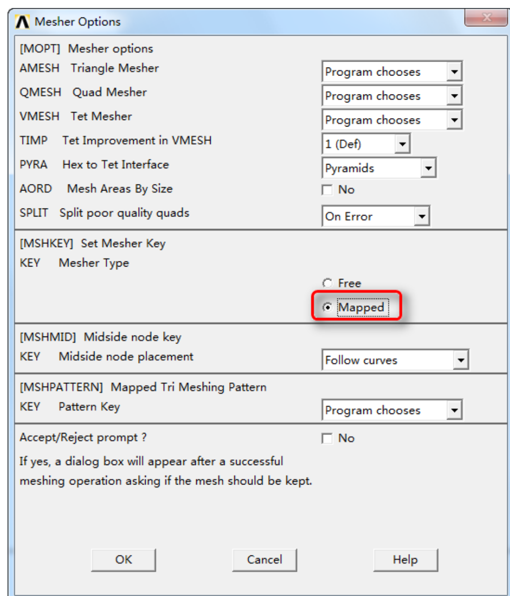


图 10-22 "Mesher Options"对话框

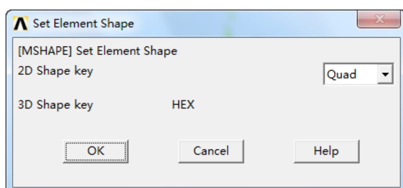


图 10-23 "Set Element Shape"对话框

⑯连接关键点生成体：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Arbitrary > Througth KPs，弹出一个拾取框，在工作平面上依次拾取编号为 1～8 的关键点，单击"OK"按钮。生成的结果如图 10-24 所示。

⑰划分单元：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided，弹出一个拾取框，单击"Pick All"按钮，结果如图 10-25 所示。

⑱保存有限元模型：单击菜单栏上的 File > Save as 选项，弹出一个对话框，在"Save database to"下面的输入栏中输入"PZT.db"，单击"OK"按钮。

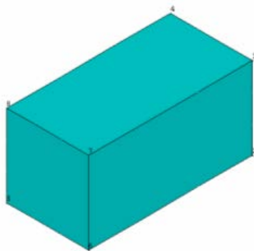


图 10-24 体生成结果显示

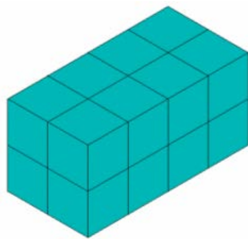


图 10-25 有限元模型显示

02 施加载荷并求解短路电路频率。

❶选择 X 坐标为 0 的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 10-26 所示的“Select Entities”对话框，在第二个下拉列表框中选中“By Location”项，选中其下的“X coordinaes”单选按钮，在“Min，Max”文本框输入“0”，单击“OK”按钮。

❷施加 X 对称位移约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C > On Nodes，弹出如图 10-27 所示的“Apply SYMM on Nodes”对话框，单击“OK”按钮。

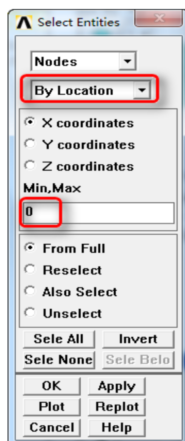


图 10-26 “Select Entities”对话框

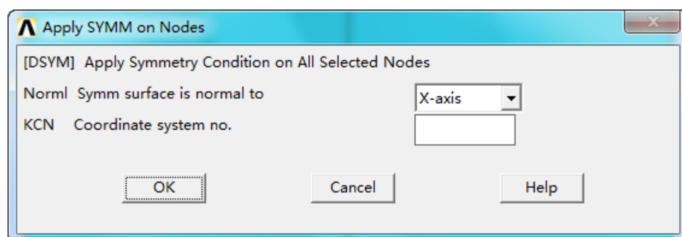


图 10-27 “Apply SYMM on Nodes”对话框

❸选择 Y 坐标为 0 的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 10-26 所示的对话框，在第二个下拉列表框中选中“By Location”项，选择“Y Coordinates”单选按钮，在“Min，Max”文本框中输入 0，单击“OK”按钮。

❹施加 Y 对称位移约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C > On Nodes，弹出如图 10-27 所示的对话框，在“Symm surface is normal to”下拉列表框中选中“Y-axis”，单击“OK”按钮。结果如图 10-28 所示。

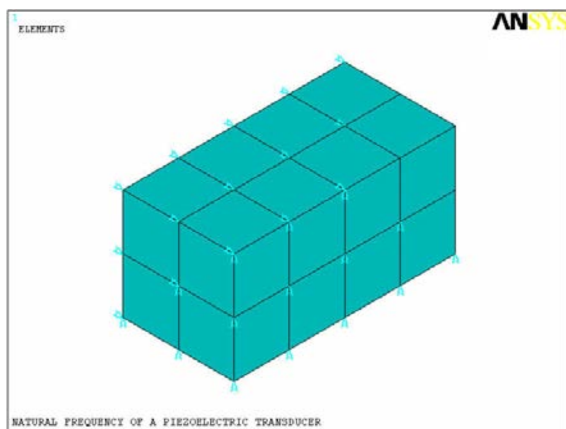


图 10-28 施加对称约束后结果显示

❺选择所有节点：Utility Menu > Select > Everything。

❻保存数据：单击菜单栏上的 SAVE_DB 按钮。

❼设定分析类型：Main Menu > Solution > Analysis Type-New Analysis，弹出如图 10-29 所示的“New Analysis”对话框，选中“Modal”选项，单击“OK”按钮。

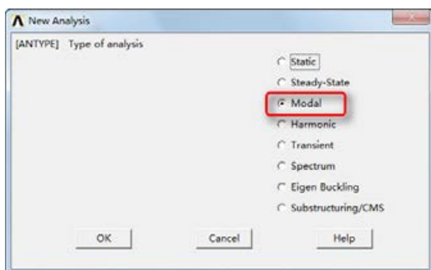


图 10-29 “New Analysis”对话框

❽选择模态提取方法：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出如图 10-30 所示“Modal Analysis”对话框，选中“Block Lanczos”模态提取法；在“No. of modes to extract”文本框中输入 10，单击“OK”按钮。再次弹出如图 10-31 所示的“Block Lanczes Method”对话框，在“Start Freq”文本框中输入 50000，在“End Frequence”文本框中输入 150000，单击“OK”按钮。

❾选择 Z 坐标为 0 的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 10-26 所示的对话框，在第二个下拉列表框中选中“By Location”项，选中“Z Coordinates”单选按钮，在“Min，Max”文本框中下输入 0，单击“OK”按钮。

❿施加电压载荷约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Nodes，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 10-32 所示的“Apply VOLT on nodes”对话框，在输入栏中输入 0，单击“OK”按钮。

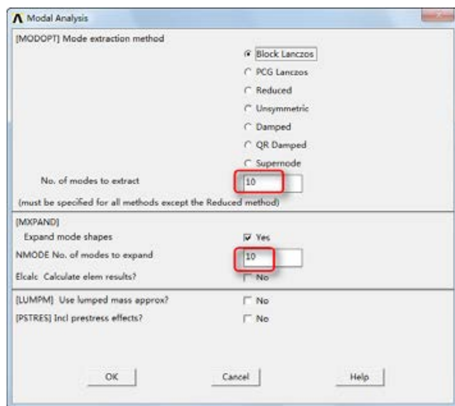


图 10-30 “Modal Analysis”对话框

⓫选择 Z 坐标为 H 的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 10-26 所示的对话框，在第二个下拉列表框中选中“By Location”项，选中“Z Coordinates”单选按

钮，在“Min，Max”文本框中输入“H”，单击“OK”按钮。

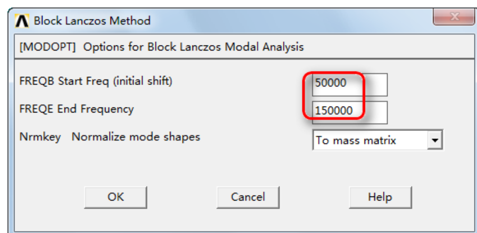


图 10-31 “Block Lanczes Method”对话框

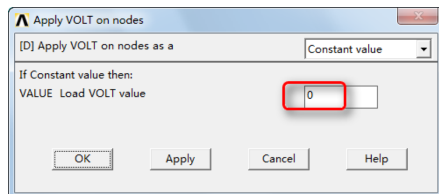


图 10-32 “Apply VOLT on nodes”对话框

⓬施加电压载荷约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Electric > Boundary > Voltage > On Nodes，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮，弹出如图 10-32 所示的对话框，在文本框中输入 0，单击“OK”按钮。生成的结果如图 10-33 所示。

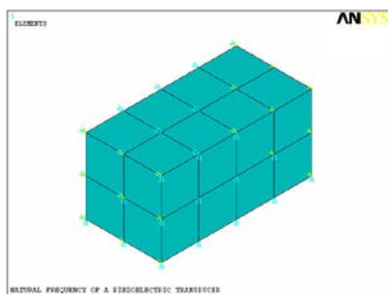


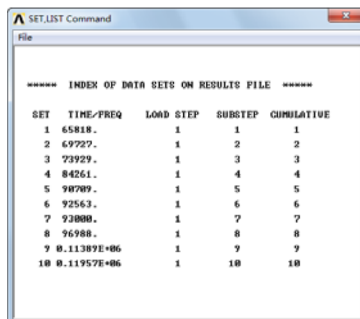
图 10-33 电压载荷约束施加后结果显示

⓭选择所有节点：Utility Menu > Select > Everything。

⓮求解：Main Menu > Solution > Current LS，弹出一个信息提示框和对话框，浏览完毕后单击 File > Close，单击对话框上的 OK，开始求解运算，当出现一个“Solution is done”的信息框时，单击“Close”按钮，完成求解运算。

03 Post1 后处理。

❶观察求解综述：Main Menu > General Postproc > Results Summary，弹出如图 10-34 所示的对话框，可以看到 10 阶模态的频率及其他信息。



SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	65818.	1	1	1
2	69727.	1	2	2
3	73929.	1	3	3
4	84261.	1	4	4
5	90709.	1	5	5
6	92563.	1	6	6
7	93000.	1	7	7
8	96988.	1	8	8
9	0.11389E+06	1	9	9
10	0.11957E+06	1	10	10

图 10-34 10 阶模态显示

❷读入一阶振型：Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set，读入一阶

振型的数据。

❸显示一阶振型的动画：Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Mode Shape ，弹出“Animate Mode Shape”对话框，如图 10-35 所示，单击“OK”按钮接受默认选项，将出现一阶振型的动画图，界面如图 10-36 所示。

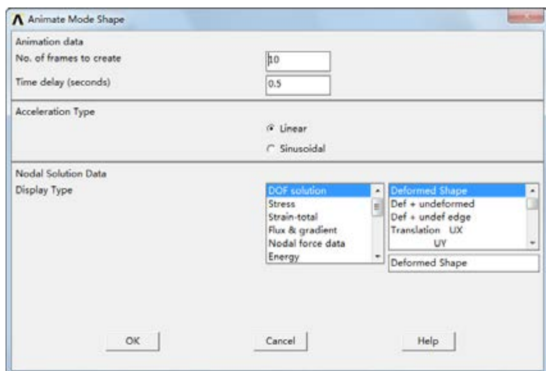
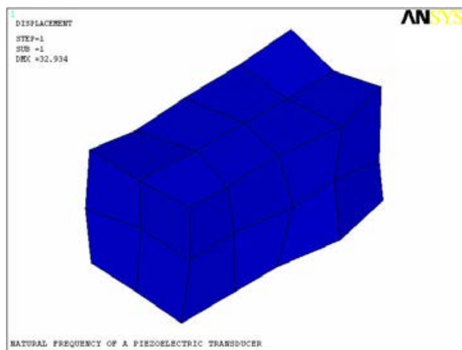


图 10-35 振型动画显示控制对话框

❹如果想停止动画，单击“Utility Menu”右上角的小按钮，弹出“Animation Contr…”工具条，如图 10-37 所示，单击“Stop”按钮或者“Close”按钮。



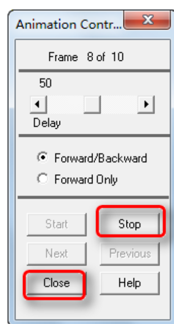


图 10-36 一阶振型截图显示　　图 10-37 动画显示控制工具条

❺读取下一阶振型：Main Menu > General Postproc > Read Results > Next Set，读入下一阶振型的数据。

❻重复❸和❹步骤可显示和关闭显示第二阶振型的动画。重复❺和❻步骤可显示和关闭显示第三阶、第四阶、第五阶等 10 阶振型的动画。

❼退出求解器：Main Menu > Finish。

04 求解公开电路频率。

❶设定分析类型：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis，弹出如图 10-29 所示的对话框，选中“Modal”单选按钮，单击“OK”按钮。

❷选择模态提取方法：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出如图 10-30 所示对话框，选中“Block Lanczos”模态提取法；在“Number of modes to extract”处输入 10；在“No. of modes to expand”处输入 10。单击“OK”按钮。又弹出

如图 10-31 所示的对话框，在“Start Freq”后面的输入栏中输入 50000，在“End Frequence”后面的输入栏中输入 150000，单击“OK”按钮。

❸选择 Z 坐标为 H 的节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 10-26 所示的对话框，单击选择第二个下拉式选择栏选中“By Location”项，在“X，Y，Z”坐标单选项中选择“Z Coordinates”，在“Min，Max”下的输入栏中输入“H”，单击“OK”按钮。

❹删除电压载荷约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Electric > Boundary > Voltage > On Nodes，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮。

❺耦合电压载荷约束：Main Menu > Preprocessor > Coupling / Ceqn > Couple DOFs，弹出一个拾取框，单击“Pick All”按钮，又弹出如图 10-38 所示的“Define Coupled DOFs”对话框，在“Set reference number”后面输入 1，在“Degree-of-freedom label”后面的下拉式选择栏中选中“VOLT”按钮，单击“OK”按钮，结果如图 10-39 所示。



图 10-38　“Define Coupled DOFs”对话框

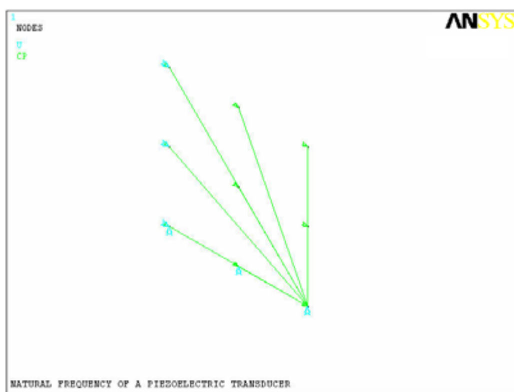


图 10-39 耦合电压载荷约束后结果显示

❻选择所有节点：Utility Menu > Select > Everything。

❼求解：Main Menu > Solution > Current LS，弹出一个信息提示框和对话框，浏览完毕后单击 File > Close，单击对话框上的“OK”按钮，开始求解运算，当出现一个 Solution is done 的信息框时，单击“Close”按钮，完成求解运算。

05 Post1 后处理。

❶观察求解综述：Main Menu > General Postproc > Results Summary，弹出如图 10-40 所示的对话框，在弹出的窗口中将会看到 10 阶模态的频率及其他信息。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	65818.	1	1	1
2	69727.	1	2	2
3	73929.	1	3	3
4	84261.	1	4	4
5	90709.	1	5	5
6	92563.	1	6	6
7	93000.	1	7	7
8	96988.	1	8	8
9	0.11389E+06	1	9	9
10	0.11957E+06	1	10	10

图 10-40 10 阶模态显示

❷读入第四阶振型：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Set Number，弹出如图 10-41 所示的“Read Results by Data Set Number”对话框，在“Data Set Number”文本框中输入 4，单击“OK”按钮，读入四阶振型的数据。

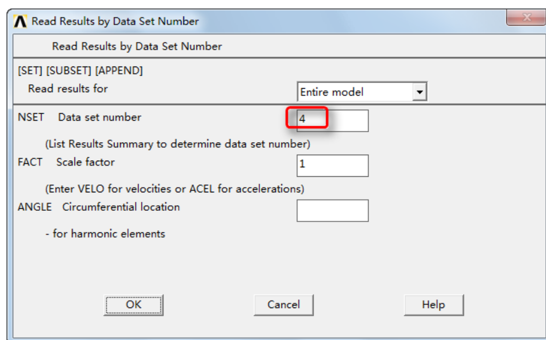


图 10-41 “Read Results by Data Set Number“对话框

❸显示四阶振型的动画：Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Mode Shape ，弹出对话框，如图 10-35 所示，单击“OK”按钮接受默认选项。屏幕将出现四阶振型的动画图，界面如图 10-42 所示。

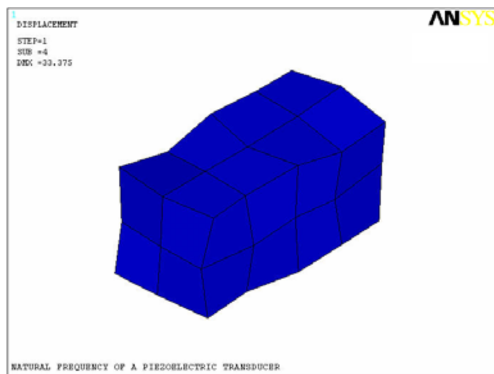


图 10-42 四阶振型截图显示

❹如果想停止动画，单击“Utility Menu”右上角的小按钮，弹出如图 10-37 所示工具条，单击“Stop”按钮或者“Close”按钮。

❺读入第八阶振型：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Set Number，

弹出如图 10-41 所示的对话框，在“Data set number”后面的输入栏中输入 8，单击“OK”按钮，读入八阶振型的数据。

❻显示八阶振型的动画：Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Mode Shape ，弹出如图 10-35 所示对话框，单击“OK”按钮接受默认选项。屏幕将出现八阶振型的动画图，界面如图 10-43 所示。

❼退出求解器：Main Menu > Finish。

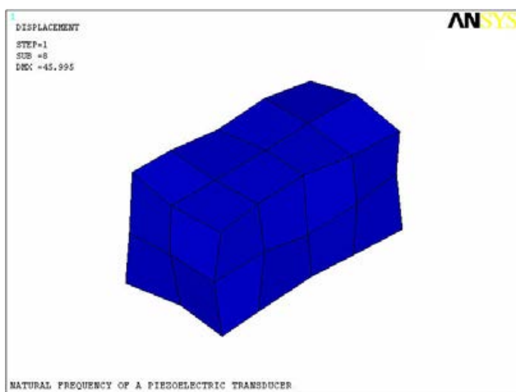


图 10-43 八阶振型截图显示

06 退出 ANSYS。单击工具栏上的“QUIT“，在出现的对话框上选择“QUIT－No Save“，单击 OK。

10.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 11 章

接触问题分析

接触问题是一种高度非线性行为，需要较大的计算资源，为了进行有效的计算，理解问题的特性和建立合理的模型是很重要的。

本章介绍 ANSYS 接触分析的全流程，讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过齿轮接触分析实例对 ANSYS 接触分析功能进行了具体演示。通过本章的学习，读者可以完整深入地掌握 ANSYS 接触分析的各种功能和应用方法。

学习要点

- 接触问题概论
- 接触问题分析步骤
- 实例：深沟球轴承的接触分析

11.1 接触问题概论

接触问题存在两个较大的难点：

（1）在求解问题之前不知道接触区域，表面之间是接触或分开是未知的，突然变化的，这些随载荷、材料、边界条件和其他因素而定。

（2）大多的接触问题需要计算摩擦，有几种摩擦和模型可供挑选，它们都是非线性的，摩擦使问题的收敛性变得困难。

11.1.1 一般分类

接触问题分为两种基本类型：刚体－柔体的接触，半柔体－柔体的接触，在刚体－柔体的接触问题中，接触面的一个或多个被当作刚体（与它接触的变形体相比，有大得多的刚度），一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，问题可以被假定为刚体－柔体的接触，许多金属成形问题归为此类接触，另一类，柔体－柔体的接触，是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体（有近似的刚度）。

ANSYS 支持 3 种接触方式：点－点，点－面，面－面，每种接触方式使用的接触单元适用于某类问题。

11.1.2 接触单元

为了给接触问题建模，首先必须认识到模型中的哪些部分可能会相互接触，如果相互作用的其中之一是一个点，模型的对应组元是一个节点。如果相互作用的其中之一是一个面，模型的对应组元是单元，例如梁单元，壳单元或实体单元，有限元模型通过指定的接触单元来识别可能的接触匹对，接触单元是覆盖在分析模型接触面之上的一层单元，ANSYS 使用的接触单元和使用它们的过程如下：

1．点－点接触单元

点－点接触单元主要用于模拟点－点的接触行为，为了使用点－点的接触单元，需要预先知道接触位置，这类接触问题只能适用于接触面之间有较小相对滑动的情况（即使在几何非线性情况下）。

如果两个面上的节点一一对应，相对滑动又可以忽略不计，两个面挠度（转动）保持小量，那么可以用点－点的接触单元来求解面－面的接触问题，过盈装配问题是一个用点－点的接触单元来模拟点－面的接触问题的典型例子。

2．点－面接触单元

点－面接触单元主要用于给点－面的接触行为建模，例如两根梁的相互接触。

如果通过一组节点来定义接触面，生成多个单元，那么可以通过点－面的接触单元来模拟面－面的接触问题，面即可以是刚性体也可以是柔性体，这类接触问题的一个典

型例子是插头插到插座里。使用这类接触单元，不需要预先知道确切的接触位置，接触面之间也不需要保持一致的网格，并且允许有大的变形和大的相对滑动。

Contact48 和 Contact49 都是点－面的接触单元，Contact26 用来模拟柔性点－刚性面的接触，对有不连续的刚性面的问题，不推荐采用 Contact26，因为可能导致接触的丢失，在这种情况下，Contact48 通过使用伪单元算法能提供较好的建模能力。

3．面－面的接触单元

ANSYS 支持刚体－柔体的面－面的接触单元，刚性面被当作“目标”面，分别用 Targe169 和 Targe170 来模拟 2D 和 3D 的“目标”面，柔性体的表面被当作“接触”面，用 Conta171、Conta172、Conta173、Conta174 来模拟。一个目标单元和一个接触单元叫作一个“接触对”，程序通过一个共享的实常号来识别“接触对”，为了建立一个“接触对”给目标单元和接触单元指定相同的实常的号。

与点－面接触单元相比，面－面接触单元有好几项优点：

- 支持低阶和高阶单元
- 支持有大滑动和摩擦的大变形，协调刚度阵计算，不对称单元刚度阵的计算
- 提供工程目的采用的更好的接触结果，例如法向压力和摩擦应力
- 没有刚体表面形状的限制，刚体表面的光滑性不是必须的，允许有自然的或网格离散引起的表面不连续
- 与点－面接触单元比，需要较多的接触单元，因而造成需要较小的磁盘空间和 CPU 时间。
- 允许多种建模控制，例如：绑定接触；渐变初始渗透；目标面自动移动到补始接触；平移接触面（老虎梁和单元的厚度）；支持死活单元；支持耦合场分析；支持磁场接触分析等。

11.2 接触问题分析的步骤

在涉及到两个边界的接触问题中，很自然把一个边界作为“目标”面而把另一个作为“接触”面，对刚体－柔体的接触，“目标”面总是刚性的，“接触”面总是柔性面，这两个面合起来叫作“接触对”。使用 Targe169 和 Conta171 或 Conta172 来定义 2D 接触对，使用 Targe170 和 Conta173 或 Conta174 来定义 3D 接触对，程序通过相同的实常数号来识别“接触对”。

执行一个典型的面－面接触分析的基本步骤如下：

（1）建立模型，并划分网格。

（2）识别接触对。

（3）定义刚性目标面。

（4）定义柔性接触面。

（5）设置单元关键点和实常数。

（6）定义/控制刚性目标面的运动。

（7）给定必须的边界条件。

（8）定义求解选项和载荷步。

（9）求解接触问题。

（10）查看结果。

11.2.1 建立模型并划分网格

在这一步中需要建立代表接触体几何形状的实体模型。与其他分析过程一样，设置单元类型、实常数、材料特性。用恰当的单元类型给接触体划分网格。

命令：AMESH，VMESH。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Mesh > Mapped > 3 or 4 Sided。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Mesh > Mapped > 4 or 6 sided。

11.2.2 识别接触对

必须认识到，模型在变形期间哪些地方可能发生接触，一是你已经识别出潜在的接触面，你应该通过目标单元和接触单元来定义它们，目标和接触单元跟踪变形阶段的运动，构成一个接触对的目标单元和接触单元通过共享的实常号联系起来。

接触区域可以任意定义，然而为了更有效地进行计算（主要指 CPU 时间），可能想定义更小的局部化的接触环，但能保证它足以描述所需要的接触行为，不同的接触对必须通过不同的实常数号来定义（即使实常数号没有变化）。

由于几何模型和潜在变形的多样性，有时候一个接触面的同一区域可能和多个目标面产生接触关系，在这种情况下，应该定义多个接触对（使用多组覆盖层接触单元）。每个接触对有不同的实常数号。

11.2.3 定义刚性目标面

刚性目标面可能是 2D 的或 3D 的。在 2D 情况下，刚性目标面的形状可以通过一系列直线、圆弧和抛物线来描述，所有这些都可以用 TAPGE169 来表示。另外，可以使用它们的任意组合来描述复杂的目标面。在 3D 情况下，目标面的形状可以通过三角面，圆柱面，圆锥面和球面来描述，所有这些都可以用“TAPGE170”来表示，对于一个复杂的，任意形状的目标面，应该使用三角面来给它建模。

1．控制节点（Pilot）

刚性目标面可能会和“pilot 节点”联系起来，它实际上是一个只有一个节点的单元，通过这个节点的运动可以控制整个目标面的运动，因此可以把 pilot 节点作为刚性目标的控制器。整个目标面的受力和转动情况可以通过 pilot 节点表示出来，“pilot 节点”可能是目标单元中的一个节点，也可能是一个任意位置的节点，只有当需要转动或力矩载荷时，“pilot 节点”的位置才是重要的，如果你定义了“pilot 节点”，ANSYS 程序只在

“pilot 节点”上检查边界条件，而忽略其他节点上的任何约束。

对于圆、圆柱、圆锥和球的基本图段，ANSYS 总是使用一个节点作为“pilot 节点”。

2．基本原型

能够使用基本几何形状来模拟目标面，例如：“圆、圆柱、圆锥、球”。有些基本原型虽然不能直接合在一起成为一个目标面（例如直线不能与抛物线合并，弧线不能与三角形合并等），但可以给每个基本原型指定它自己的实常数号。

3．单元类型和实常数

在生成目标单元之前，首先必须定义单元类型（TARG169 或 TARG170）。

命令：ET。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete。

随后必须设置目标单元的实常数。

命令：Real。

GUI：Main Menn > Preprocessor > Real Constants。

4．使用直接生成法建立刚性目标单元

为了直接生成目标单元，使用下面的命令和菜单路径。

命令：TSHAP。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes。

随后指定单元形状，可能的形状有：Straight Line (2D)；Parabola (2D)；Clockwise arc(2D)；Counterclokwise arc(2D)；Circle(2D)；Triangle (3D)；Cylinder (3D)；Cone (3D)；Sphere(3D)；Pilot node(2D 和 3D)，如图 11-1 所示。

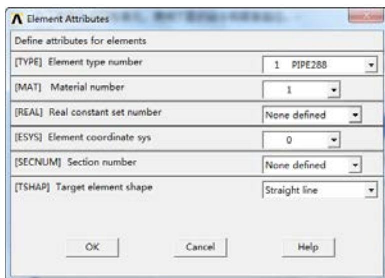


图 11-1 单元属性对话框

一旦指定目标单元形状，所有以后生成的单元都将保持这个形状，除非指定另外一种形状。然后就可以使用标准的 ANSYS 直接生成技术生成节点和单元。

命令：N，E。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements。

在建立单元之后，可以通过显示单元来验证单元形状。

命令：ELIST。

GUI：Utility Menu > List > Elements > Nodes + Attributes。

5．使用 ANSYS 网格划分工具生成刚性目标单元

也可以使用标准的 ANSYS 网格划分功能让程序自动地生成目标单元，ANSYS 程序将会以实体模型为基础生成合适的目标单元形状而忽略 TSHAP 命令的选项。

为了生成一个“PILOT”节点，使用下面的命令或 GUI 路径：

命令：Kmesh。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Keypoints。


KMESH 总是生成“PILOT 节点”。

11.2.4 定义柔性体的接触面

为了定义柔性体的接触面，必须使用接触单元 CONTA171 或 CONTA172（对 2D）或 CONTA173 或 CONTA174（对 3D）来定义表面。

程序通过组成变形体表面的接触单元来定义接触表面，接触单元与下面覆盖的变形体单元有同样的几何特性，接触单元与下面覆盖的变形体单元必须处于同一阶次（低阶或高阶）下面的变形体单元可能是实体单元、壳单元、梁单元或超单元，接触面可能壳或梁单元任何一边。

与目标面单元一样，必须定义接触面的单元类型，然后选择正确的实常数号（实常数号必须与它对应目标的实常数号相同）最后生成接触单元。

1．单元类型

CONTA171：这是一种 2D 的 2 个节点的低阶线性单元，可能位于 2D 实体，壳或梁单元的表面。

CONTA172：这是一个 2D 的 3 个节点的高阶抛物线形单元，可能位于有中节点的 2D 实体或梁单元的表面。

CONTA173：这是一个 3D 的 4 个节点的低阶四边形单元，可能位于 3D 实体或壳单元的表面，它可能褪化成一个 3 节点的三角形单元。

CONTA174：这是一个 3D 的 8 个节点的高阶四边形单元，可能位于有中节点的 3D 实体或壳单元的表面，它可能褪化成 6 个节点的三角形单元。

不能在高阶柔性体单元的表面上分成低阶接触单元，反之也不行，不能在高阶接触单元上消去中节点。

命令：ET。

GUI：Main menu > Preprocessor > Element type > Add/Edit/Delete。

2．实常数和材料特性

在定义了单元类型之后，需要选择正确的实常数的设置，每个接触对的接触面和目标面必须有相同的实常数号，而每个接触对必须有它自己不同的实常数号。

3．生成接触单元

可以通过直接生成法生成接触单元，也可以在柔性体单元的外表面上自动生成接触单元，推荐采用自动生成法，这种方法更为简单和可靠。

可以通过下面 3 个步骤来自动生成接触单元：

（1）选择节点。选择已划分网格的柔性体表面的结果，如果确定某一部分节点永远不会接触到目标面，则可以忽略它以便减少计算时间，然而，必须保证没有漏掉可能会接触到目标面的节点。

命令：NSEL。

GUI：Utility Menu > Select > Entities。

（2）产生接触单元

命令：ESURF。

GUI：Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Element > Surf / Contact > Surf to Surf。

如果接触单元是附在已用实体单元划分网格的面或体上，程序会自动决定接触计算所需的外法向，如果下面的单元是梁或壳单元，则必须指明哪个表面（上表面或下表面）是接触面

命令：ESURF，TOP OR BOTIOM。

GUI：Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Element > Surf / Contact > Surf to Surf。

使用上表面生成接触单元，则它们的外法向与梁或壳单元的法向相同，使用下表面生成接触单元，则它们的外法向与梁或壳单元的法向相反，如果下面的单元是实体单元，则 TOP 或 BOTTOM 选项不起作用，如图 11-2 所示。

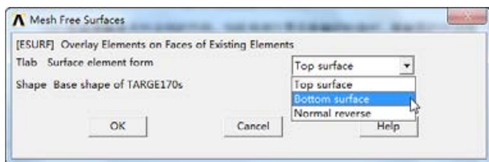


图 11-2 表面接触单元对话框

（3）检查接触单元外法线的方向。当程序进行是否接触的检查时，接触面的外法线方向是重要的，对 3-D 单元，按节点序号以右手定则来决定单元的外法向，接触面的外法向应该指向目标面，否则，在开始分析计算时，程序可能会认为有面的过度渗透而很难找到初始解。此时，程序一般会立即停止执行，可以检查单元外法线方向是否正确。

命令：/PSYMB。

GUI：Utility menu > PlotCtrls > Symbols。

当发现单元的外法线方向不正确时，必须通过修正不正确单元的节点号来改变它们。

命令：ESURF，REVE

GUI：Main menu > Preprocossor > Modeling > Create > Elements > Surf / Contact。

或者重新排列单元指向。

命令：ENORM。

GUI：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Elements > Shell Normals。

11.2.5 设置实常数和单元关键点

程序使用 20 多个实常数和好几个单元关键点来控制面－面接触单元的接触行为。

1．常用的实常数

程序经常使用的实常数如表 11-1 所示。

表 11-1 实常数列表

实常数	用途
R1 和 R2	定义目标单元几何形状
FKN	定义法向接触刚度因子
FTOLN	定义最大的渗透范围
ICONT	定义初始靠近因子
PINB	定义“Pinball"区域
PMIN 和 PMAX	定义初始渗透的容许范围
TAUMAR	指定最大的接触摩擦

命令：R。

GUI：Main menu > Preprocessor > Real Constants。

对实常数 FKN，FTOLN，ICONT，PINB，PMAX，和 PMIN，既可以定义一个正值也可以定义一个负值，程序将正值作为比例因子，将负值作为真实值，程序将下面覆盖原单元的厚度作为 ICON，FTOLN，PINB，PMAX 和 PMIN 的参考值，例如对 ICON，0.1 表明初始间隙因子是 0.1*下面覆盖层单元的厚度。然而，-0.1 表明真实缝隙是 0.1，如果下面覆盖层单元是超单元，则将接触单元的最小长度作为厚度。

2．单元关键点

每种接触单元都有好几个关键点，对大多的接触问题默认的关键点是合适的，而在某些情况下，可能需要改变默认值，来控制接触行为。

- 自由度 （KEYOPT(1)）
- 接触算法（罚函数+拉格郎日或罚函数）（KEYOPT（2））
- 出现超单元时的应力状态（KEYOPT（3））
- 接触方位点的位置 （KEYOPI（4））
- 刚度矩阵的选择 （KEYOPT（6））
- 时间步长控制 （KEYOPT（7））
- 初始渗透影响 （KEYOPT（9））
- 接触刚度修正 （KEYOPT（10））
- 壳体厚度效应 （KEYOPT（11））
- 接触表面情况 （KEYOPT（12））

命令：KEYOPT，ET。

GUI：Main menu > Preprocessor > Elemant Type > Add/Edit/Delete。

11.2.6 控制刚性目标的运动

按照物体的原始外形来建立的刚性目标面，面的运动是通过给定“pilot”节点来定义的。如果没有定义“pilot”节点，则通过刚性目标面上的不同节点来定义。

为了控制整个目标面的运动，在下面的任何情况下都必须使用“pilot”节点：

- 目标面上作用着给定的外力。
- 目标面发生旋转。
- 目标面和其他单元相连（例如结构质量单元）。

“pilot”节点的厚度代表着整个刚性面的运动，可以在“pilot”节点上给定边界条件（位移、初速度、集中载荷、转动等），为了考虑刚体的质量，在“pilot”节点上定义一个质量单元。

当使用“pilot”节点时，记住下面的几点局限性：

- 每个目标面只能有一个“Pilot“的节点
- 圆、圆锥、圆柱、球的第一个节点是“pilot”节点，不能另外定义或改变“pilot”节点
- 程序忽略不是“pilot”节点的所有其他节点上的边界条件。
- 只有“pilot”节点能与其他单元相连
- 当定义了“pilot”节点后，不能使用约束方程（CF）或节点来耦合（CP）来控制目标面的自由度，如果在刚性面上给定任意载荷或者约束，必须定义“pilot”节点，是在“pilot”节点上加载，如果没有使用“pilot”节点，只能有刚体运动。

在每个载荷步的开始，程序检查每个目标面的边界条件，如果下面的条件都满足，那么程序将目标面作为固定处理：

- 在目标面节点上没有明确定义边界条件或给定力
- 目标面节点没有和其他单元相连
- 目标面节点没有使用约束方程或节点耦合

在每个载荷步的末尾，程序将会放松被内部设置的约束条件。

11.2.7 给变形体单元施加必要的边界条件

现在可以按需要加上任意的边界条件。加载过程与其他的分析类型相同

11.2.8 定义求解和载荷步选项

接触问题的收敛性随着问题的不同而不同，下面列出了一些典型的在大多数面－面的接触分析中推荐使用的选项。

时间步长必须足够小，以描述适当的接触 。如果时间步太大，则接触力的光滑传递会被破坏，设置精确时间步长的可信赖的方法是打开自动时间步长。

命令：Autots，On。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time-Time Step or Time and Substps。

如果在迭代期间接触状态变化，可能发生不连续，为了避免收敛太慢，使用修改的刚度阵，将牛顿一拉普森选项设置成 FULL。

命令：NROPT，FULL，，OFF。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options。

不要使用自适应下降因子，对面一面的问题，自适应下降因子通常不会提供任何帮助，因此建议关掉它。

设置合理的平衡迭代次数，一个合理的平衡迭代次数通常在 25～50 之间，如图 11-3 所示。

命令：NEQIT。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter。

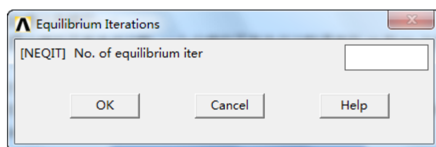


图 11-3 平衡迭代次数对话框

因为大的时间增量会使迭代趋向于变得不稳定，使用线性搜索选项来使计算稳定化。如图 11-4 所示。

命令：LNSRCH

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Nonlinear > Line Search。

除非在大转动和动态分析中，打开时间步长预测器选项。如图 11-5 所示。

命令：PRED。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Nonlinear > Predictor。

在接触分析中许多不收敛问题是由于使用了太大的接触刚度引起的（实常数 FKN），检验是否使用了合适的接触刚度。

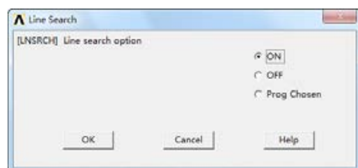


图 11-4 线性搜索对话框

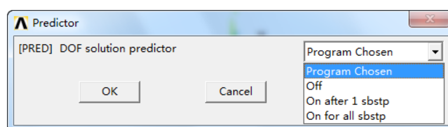


图 11-5 时间步长预测器选项

11.2.9 求解

现在可以对接触问题进行求解，求解过程与一般的非线性问题求解过程相同。

11.2.10 检查结果

接触分析的结果主要包括位移、应力、应变和接触信息（接触压力、滑动等），可以在通用后处理器（Post1）或时间历程后处理器（Post26）中查看结果。



1）为了在 Post1 中查看结果，数据库文件所包含的模型必须与用于求解的模型相同。2）必须存在结果文件。

1．在 Post1 中查看结果

进入 Post1，如果用户的模型不在当前数据库中，使用恢复命令（resume）来恢复它。

命令：/Post1。

GUI：Main Menu > General Postproc。

读入所期望的载荷步和子步的结果，这可以通过载荷步和子步数也可以通过时间来实现。

命令：SET。

GUI：Main Menu > General Postproc > Read Results。

使用下面的任何一个选项来显示结果：

（1）显示变形

命令：PLDISP。

GUI：Main menu > General Postproc > Plot Result > Deformed Shape。

（2）等值显示

命令：PLNSOL。

命令：PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Result > Contour Plot > Noded Solu。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Result > Contour Plot > Element Solu。

使用这个选项来显示应力，应变或其他项的等值图，如果相邻的单元有不同的材料行为（例如塑性或多弹性材料特性，不同的材料类型，或不同的死活属性），则在结果显示时应避免节点应力平均错误。

也可以将求解出来的接触信息用等值图显示出来，对 2D 接触分析，模型用灰色表示，所要求显示的项将沿着接触单元存在的模型的边界以梯形面积表示出来；对 3D 接触分析，模型将用灰色表示，而要求的项在接触单元存在的 2D 表面上等值显示。

还可以等值显示单元表的数据和线性化单元数据。

命令：PLETAB。

命令：PLLS。

GUI：Main Menu > General Postproc > Element Table > Plot Element Table。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour plot > line Elem Res。

（3）列表显示

命令：PRNSOL，PRESOL，PRRSOL，PRETAB，RITER，NSORT，ESORT。

GUI：Main menu > General Postproc > List Results > Noded Solution。

GUI：Main menu > General Postproc > List Results > Element Solution。

GUI：Main menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution。

在列表显示它们之前，可以用命令 NSORT 和 ESORT 来对它们进行排序。

（4）动画。可以动画显示接触结果随时间的变化。

命令：ANIME。

GUI：Uility menn > Plotctrls　> Animate。

2．在 Post26 中查看结果

可以使用 Post26 来查看一个非线性结构对加载历程的响应，可以比较一个变量和另一个变量的变化关系，例如，可以画出某个节点位移随给定载荷的曲线变化关系，某个节点的塑性应变与时间的关系。

（1）进入 Post26，如果模型不在当前数据库中恢复它。

命令：/Post26。

GUI：Main menu > TimeHist Postpro。

（2）定义变量

命令：NSOL，ESOL，RFORCE。

GUI：Main Menu > Time List Postpro > Define Variable。

（3）画曲线或列表显示

命令：PLVAR，PRVAR，EXTREM。

GUI：Main menu > Time List Postproc > Graph Variable。

GUI：Main menu > Time List Postproc > List Variarle。

GUI：Main menu > Time List Postproc > List Extremes。

11.3 实例导航——深沟球轴承的接触分析

11.3.1 问题描述

如图 11-6 所示，以 6300 为例进行分析：材料选择 GCr15 制造，该型号的几何参数为：外径 D 为 φ35，内径 d 为 φ10，宽度 B 为 11，钢球直径 Dw 为 φ6.4，接触角 α 为零，钢球数量 Z 为 7 个。材料参数：弹性模量 E=207000MPa，泊松比 μ=0.3。接触面应力为 3472.00N。观察深沟球轴承接触面的应力。

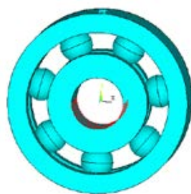


图 11-6 圆柱套筒示意图

11.3.2 GUI方式

01 建立模型。

❶定义工作文件名：Utility Menu > File > Change Jobname，弹出如图 8-2 所示的“ChangeJobname”对话框，在“Enter new jobname”文本框中输入“Bearing”，并将“New Log and error files”复选框选为“yes”，单击“OK”按钮。

❷设置分析标题：Utility Menu > File > ChangeTitle，在输入栏中键入“Contact Analysis”，单击“OK”按钮。

❸定义单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，出现“Element Types”对话框，如图 11-7 所示，单击“Add”按钮，弹出如图 11-8 所示的“Library of Element Types”对话框，单击选择“Structural Solid 和 Brick 8node 185”，单击“OK”按钮，然后单击“Element Types”对话框的“Close”按钮。

❹定义材料性质：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出如图 11-9 所示的“Define Material Model Behavior”对话框，在“Material Models Available”栏目中连续单击 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，弹出如图 11-10 所示“Linear Isotropic Propertities for Material”对话框，在“EX”后面输入“3E007”，在“PRXY”后面输入 0.25，单击“OK”按钮。然后执行“Define Material Models Behavior”对话框上的 Material > Exit 退出。

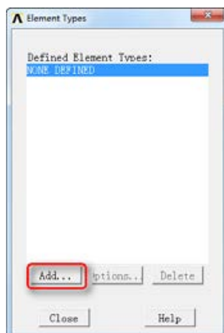


图 11-7 “Element Types”对话框

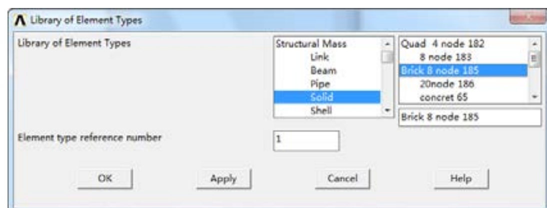


图 11-8 “Library of Element Types”对话框

❺偏移工作平面到给定位置。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > XYZ Locations +。打开设置点对话框，在 ANSYS 输入窗口输入“0,0，-5.5”，单击“OK”按钮，如图 11-11 所示。

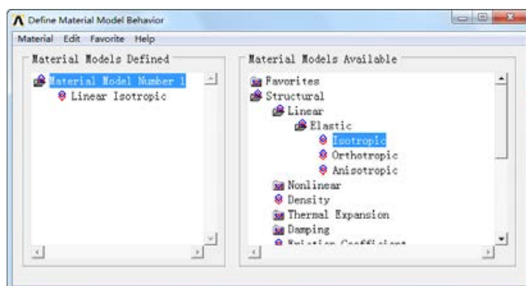


图 11-9 “Define Material Model Behavior”对话框

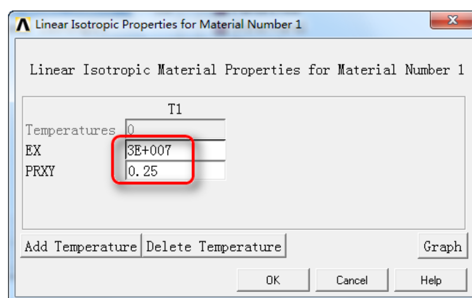


图 11-10 “Linear Isotropic Propertities for Material”对话框

❻生成外环：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Hollow Cylinder，弹出如图 11-12 所示的“Hollow Cylinder”对话框，在“WP X”后面输入 0，“WP Y”后面输入 0，“Rad-1”后面输入 17.5，“Rad-2”后面输入 13.8，在“Depth”后面输入 11，单击“Apply”按钮。

❼生成内环：在弹出的“Hollow Cylinder”对话框中，“WP X”后面输入 0”“WP Y”后面输入 0，“Rad-1”后面输入 9.7，“Rad-2”后面输入 5，在“Depth”后面输入 11，单击“OK”按钮。绘制的结果如图 11-13 所示。

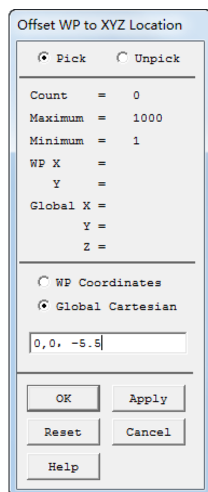


图 11-11 偏移工作平面

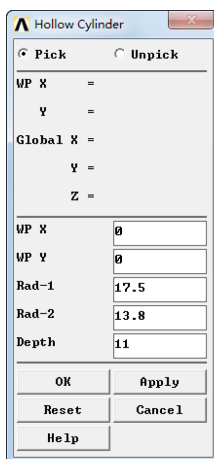


图 11-12 “Hollow Cylinder”对话框

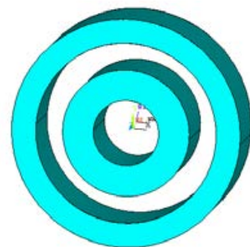


图 11-13 内外环模型

❽恢复工作平面到原始位置。从应用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Offset WP to > Global Origin。

❾生成圆环：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Torus，弹出如图 11-14 所示的“Create Torus by Dimensions”对话框，在“RAD1”后面输入 3.2，“RAD2”后面输入 0，“RADMAJ”后面输入 11.75，单击“OK”按钮。

❿从内外环中“减”去圆环形成滚珠轨道。从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Volumes。在图形窗口中拾取外环及内环，作为布尔“减”操作的母体，单击“Apply”按钮。在图形窗口中拾取刚刚建立的圆环作为“减”去的对象，单击“OK”按钮，所得结果如图 11-15 所示。

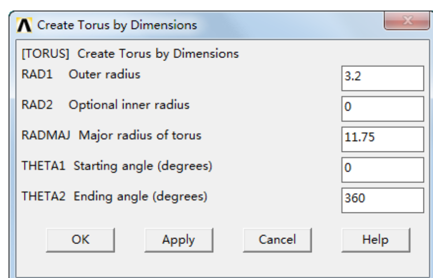


图 11-14 “Create Torus by Dimensions”对话框

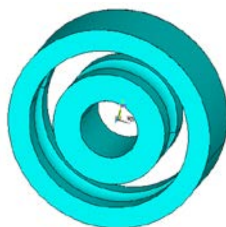


图 11-15 形成滚珠轨道

⓫生成滚珠：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Sphere > Solid Sphere，弹出如图 11-16 所示的“Solid Sphere”对话框，在“WP X”后面输入 0，“WP Y”后面输入-11.75，“Radius”后面输入 3.2，单击“OK”按钮。结果如图 11-17 所示。

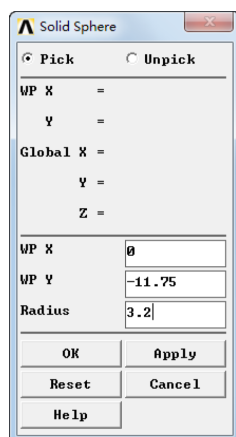


图 11-16 “Solid Sphere”对话框

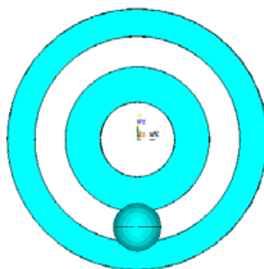


图 11-17 生成滚珠

⓬将激活的坐标系设置为总体柱坐标系。从实用菜单中选择 Utility Menu：WorkPlane > Change Active CS to > Global Cylindrical。

⓭将滚珠沿周向方向复制。从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Modeling > Copy > Volumes。选择刚刚建立的滚珠，如图 11-18 所示。ANSYS 会提示复制的数量和

偏移的坐标，在“Number of copies”文本框中输入“7”，在“Y-offset in active CS”文本框中输入“51.42857”，单击“OK”按钮，如图 11-19 所示。

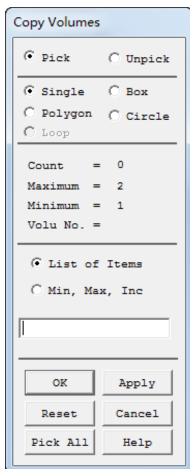


图 11-18 复制体

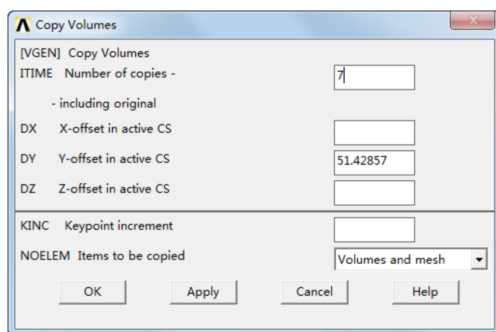


图 11-19 输入复制的数量和坐标

⓮打开体编号显示：Utility Memu > PlotCtrls > Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，在“VOLU Volume numbers”后面单击使其显示为“On”，如图 11-20 所示，单击“OK”按钮。

⓯重新显示：Utility Menu > Plot > Replot，结果显示如图 11-21 所示。

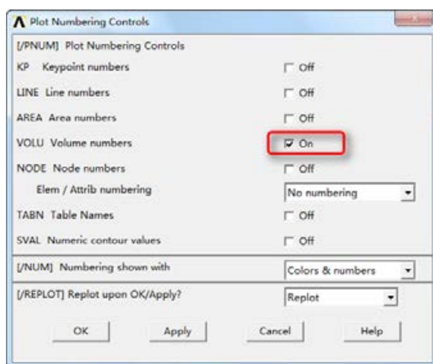


图 11-20 “Plot Numbering Controls”对话框

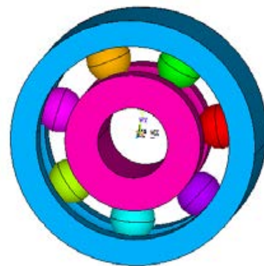


图 11-21 深沟球轴承显示

⓰保存数据：单击工具条上的 SAVE_DB 按钮。

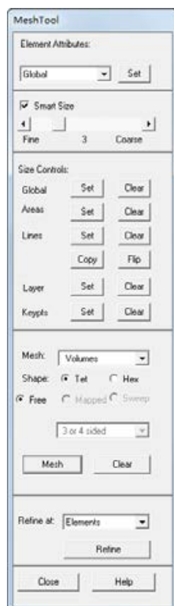
02 对轴承划分网格。

❶从主菜单中选择 Main Menu：Preprocessor > Meshing > MeshTool 命令，打开“Mesh Tool”（网格工具），如图 11-22 所示。

❷选择“Smart Size”复选框，然后向左拖动滑块到 3。然后选择“Mesh”域中的“Volumes”，单击“Mesh”，打开面选择对话框，要求选择要划分数的体。单击“Pick All”按钮，如图 11-23 所示。

❸ANSYS 会根据进行的控制划分体，划分过程中 ANSYS 会产生提示，如图 11-24 所示，单击“Close”按钮。

划分后的体如图 11-25 所示。



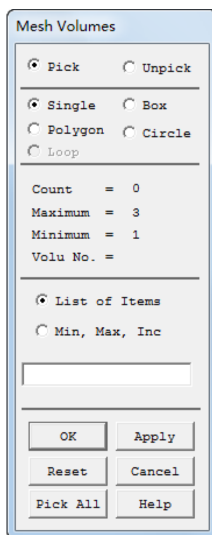


图 11-22 网格工具　　　　　图 11-23 进行体选择

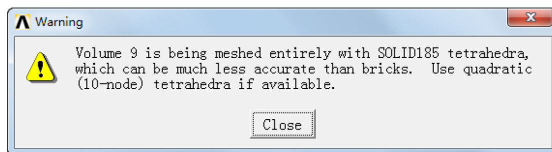


图 11-24 分网提示



图 11-25 对体划分的结果

❹优化网格：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Size and Shape，弹出如图 11-26 所示的“Size and Shape”对话框，在“[EFACET] Facets/element edge”后面的下拉列表选择“2 facets/edge”，单击“OK”按钮。

❺保存数据：单击 ANSYS Toolbar 上的“SAVE_DB”按钮。

03 定义外环与滚珠接触对。

❶创建目标面：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Contact Pair，弹出如图 11-27 所示的“Contact Manager”对话框，单击“Contact Wizard”按钮（对话框左

上角)。弹出如图 11-28 所示的“Contact Wizard”对话框,接受默认选项,单击“Pick Target”按钮,弹出一个拾取框,在图形上单击拾取外环的轨道槽,如图 11-29 所示,单击“OK”按钮。

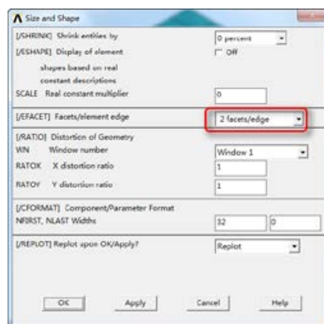


图 11-26　“Size and Shape”对话框

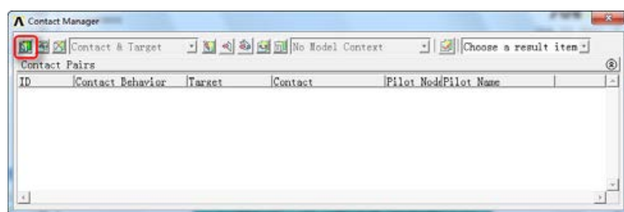


图 11-27　“Contact Manager”对话框

❷创建接触面:屏幕再次弹出“Contact Wizard”对话框,单击“Next”按钮,弹出如图 11-30 所示的“Contact Wizard”对话框,在“Contact Element Type”下面的单选栏中选中“Surface-to-Surface”,单击“Pick Contact”按钮,弹出一个拾取框,在图形上单击拾取滚珠与外环的接触面,如图 11-31 所示,单击“OK”按钮,再次弹出“Contact Wizard”按钮,单击“Next”按钮。

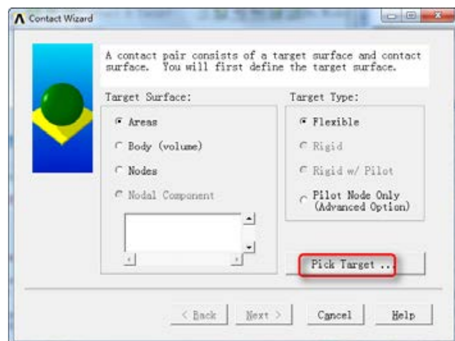


图 11-28 选择目标面对话框

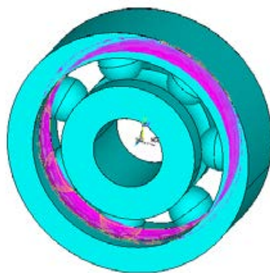


图 11-29 选择目标面的显示

❸设置接触面:又弹出“Contact Wizard”对话框,如图 11-32 所示,在“Coefficient of Friction”后面输入 0.2,单击“Optional settings”按钮,弹出如图 11-33 所示的对话框,在“Normal Penalty Stiffness”后面输入 0.1。单击“Friction”标签,选择“Stiffness matrix”后下拉列表中的“Unsymmetric”,如图 11-34 所示。单击“OK”按钮。

❹接触面的生成：又回到“Contact Wizard”对话框，单击“Create”按钮，弹出“Contact Wizard”对话框，如图 11-35 所示，单击“Finish”按钮，结果如图 11-36 所示。然后关闭对话框。

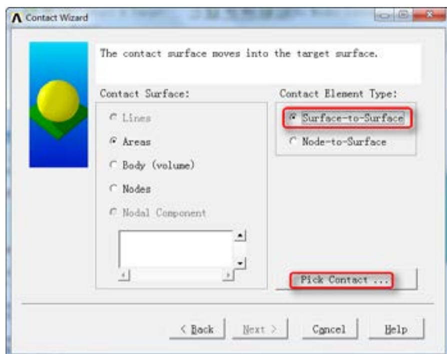


图 11-30 选择接触面对话框

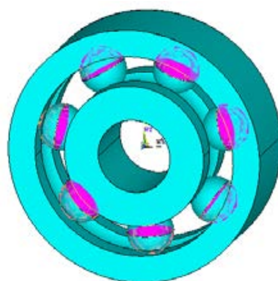


图 11-31 选择接触面的显示

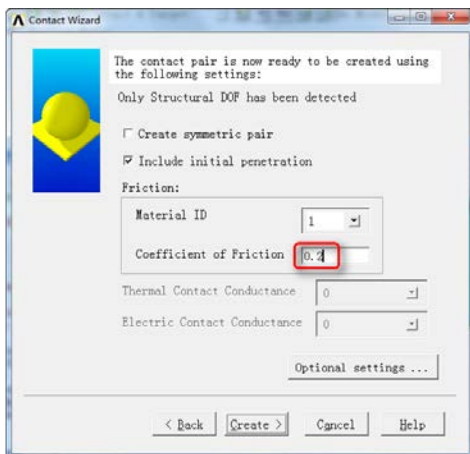


图 11-32 定义接触面性质对话框

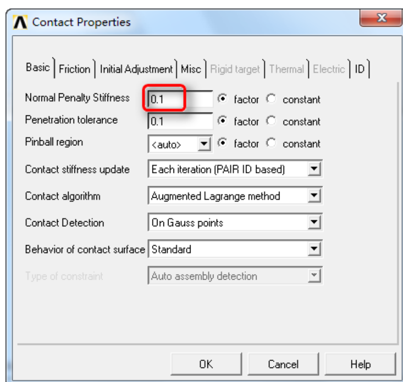


图 11-33 “Contact Properties”对话框

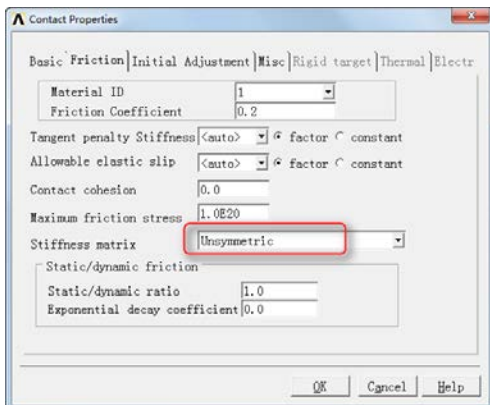


图 11-34 “Friction”标签

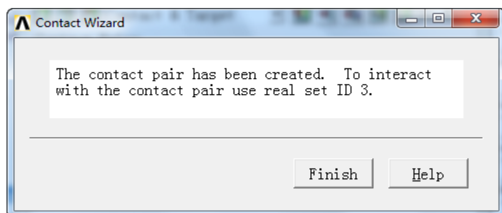


图 11-35 创建完成接触面提示框

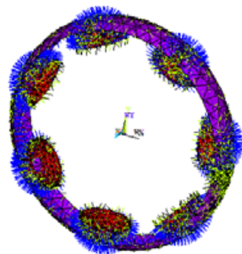


图 11-36 接触面显示

04 定义内环与滚珠接触对。

❶创建目标面：在 “Contact Manager”对话框中单击“Contact Wizard”按钮（对话框左上角）。弹出“Contact Wizard”对话框，接受默认选项，单击“Pick Target”按钮，弹出一个拾取框，在图形上单击拾取内环的轨道槽，如图 11-37 所示，单击“OK”按钮。

❷创建接触面：屏幕再次弹出“Contact Wizard”对话框，单击“Next”按钮，弹出“Contact Wizard”对话框，在“Contact Element Type”下面的单选栏中选中“Surface-to-Surface”，单击“Pick Contact”按钮，弹出一个拾取框，在图形上单击拾取滚珠与内环的接触面，如图 11-38 所示，单击“OK”按钮，再次弹出“Contact Wizard”按钮，单击“Next”按钮。

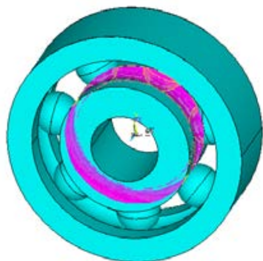


图 11-37 选择目标面的显示

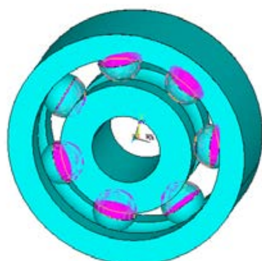


图 11-38 选择接触面的显示

❸设置接触面：又弹出“Contact Wizard”对话框，在“Coefficient of Friction”后面输入 0.2，单击“Optional settings”按钮，在“Normal Penalty Stiffness”后面输入 0.1。单击“Friction”标签，选择“Stiffness matrix”后下拉列表中的“Unsymmetric”。单击“OK”按钮。

❹接触面的生成：又回到“Contact Wizard”对话框，单击“Create”按钮，弹出“Contact Wizard”对话框，单击“Finish”按钮,结果如图 11-39 所示。

05 施加载荷并求解。

❶打开面编号显示：Utility Menu > PlotCtrls > Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，选中“AREA Area numbers”复选框使其显示为“On”，单击“OK”按钮。

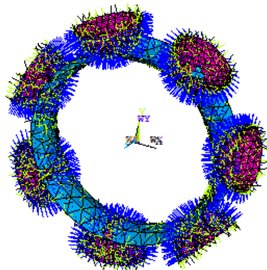


图 11-39 接触面显示

❷施加面约束条件：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas，弹出一个拾取框，在图形上拾取编号为 1、2、3、4 的面，即外环的侧面及外表面，如图 11-40 所示，单击“OK”按钮，又弹出如图 11-41 所示的“Apply U, ROT on Areas”对话框，单击选择“All DOF”选项，然后单击“OK”按钮。

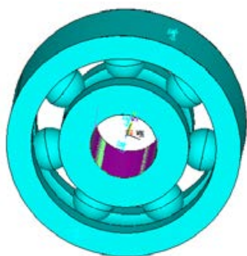


图 11-40 选择压力面

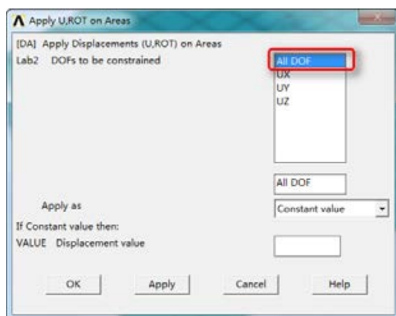


图 11-41 施加位移约束

❸施加载荷：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Elements，弹出“Apply PRES on elems”拾取菜单。拾取最内环面的下半部分，然后单击“OK”按钮，弹出“Apply PRES on elems”对话框，如图 11-42 所示。在“VALUE Load PRES value”后面输入 3472，单击“OK”按钮接受其余默认设置。

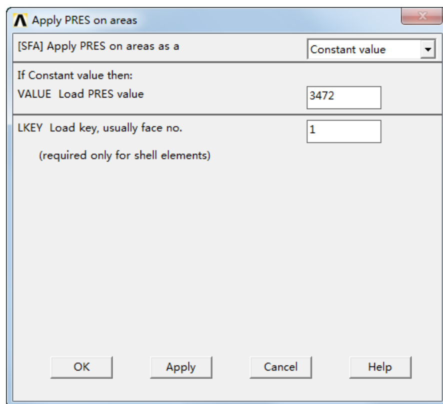


图 11-42 施加面载荷

❹设定求解选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol’n Controls，弹出“Solution Controls”对话框，在“Analysis Options”的下拉列表中选择“Large Displacement Static”，在“Time at end of loadstep”后面输入100，在“Automatic time stepping”下拉列表中选择“Off”，在“Number of substeps”后面输入1，如图11-43所示，单击“OK”按钮。

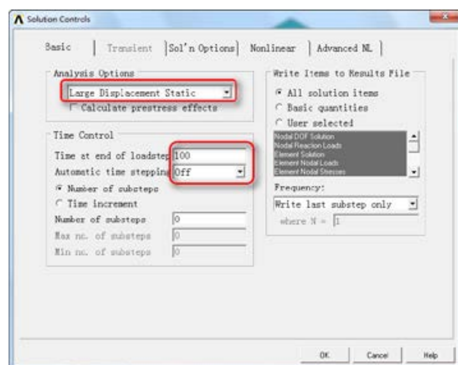


图11-43 “Solution Controls”对话框

❺求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”状态窗口和“Solve Current Load Step”对话框，仔细浏览状态窗口中的信息然后关闭它，单击“Solve Current Load Step”（求解当前载荷步）对话框中的“OK”按钮开始求解。求解完成后会弹出“Solution is done”提示框，单击“Close”按钮。

11.3.3 查看结果

求解完成后，就可以利用ANSYS软件生成的结果文件（对于静力分析，就是Jobname.RST）进行后处理。静力分析中通常通过POST1后处理器就可以处理和显示大多数感兴趣的结果数据。

01 查看变形。

❶从主菜单中选择Main Menu：General Postproc > Plot Result > Contour Plot > Nodal Solu命令，打开“Contour Nodal Solution Data”（等值线显示节点解数据）对话框，如图11-44所示。

❷在“Item to be contoured”（等值线显示结果项）域中选择“DOFsolution”（自由度解）选项。

❸在列表框中选择“Y-Component of displacement”（Y向位移）选项，Y向位移即为轴承竖直方向的位移。

❹选择“Deformed shape with undeformed dge“（变形后和未变形轮廓线）单选按钮。

❺单击“OK”按钮，在图形窗口中显示出变形图，包含变形前的轮廓线，如图11-45所示。图中下方的色谱表明不同的颜色对应的数值（带符号）。

02 查看应力。

❶从主菜单中选择 Main Menu：General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu 命令，打开“Contour Nodal Solution Data“（等值线显示节点解数据）对话框，如图 11-46 所示。

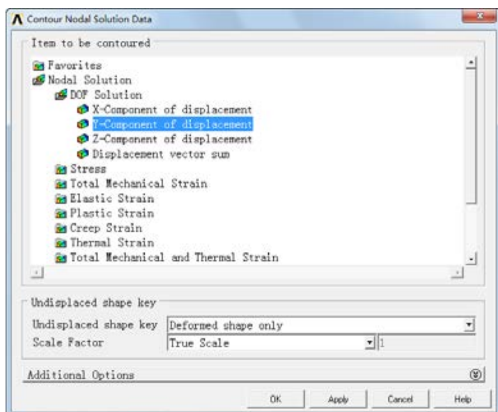


图 11-44 等值线显示节点解数据对话框

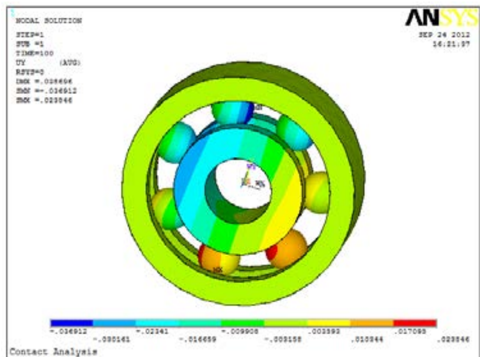


图 11-45　Y 向变形图

❷在“Item to be contoured“（等值线显示结果项）域中选择”Total Mechanical Strain“（应变）选项。

❸在列表框中选择“von Mises total mechanical strain“（von Mises 应变）选项。

❹选择“Deformed shape only“（仅显示变形后模型）单选按钮。

❺单击“OK”按钮，图形窗口中显示出“von Mises“应变分布图，如图 11-47 所示。

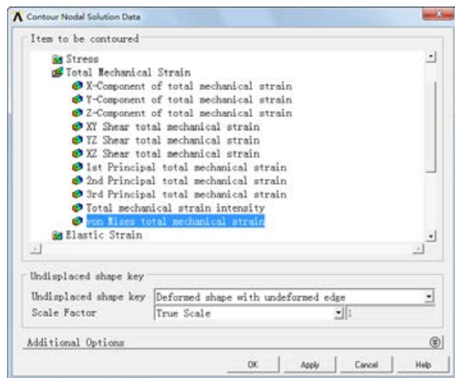


图 11-46 等值线显示节点解数据对话框

03 动画显示模态形状。

❶从应用菜单中选择 Utility Menu：　PlotCtrls > Animate > Mode Shape

❷选择　“DOF solution”，.选择“Translation UY”，单击“OK”按钮。如图 11-48 所示。

ANSYS 将在图形窗口中进行动画显示，如图 11-49 所示。

11.3.4 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

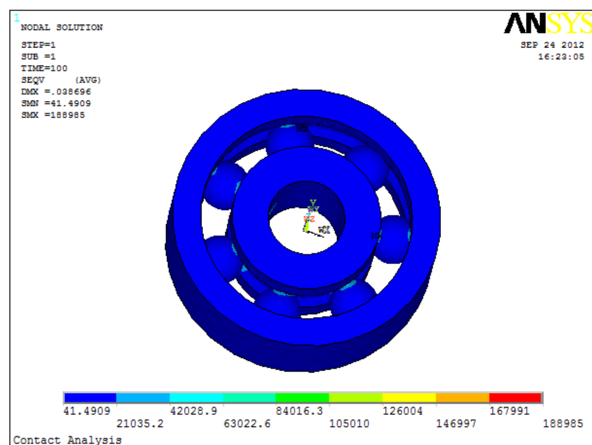


图 11-47 “von Mises“应变分布图

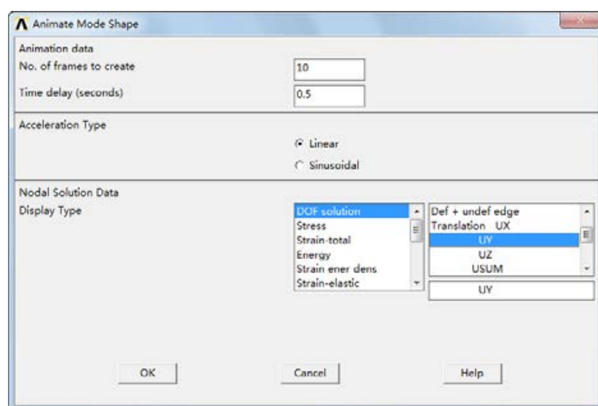


图 11-48 设置动画显示

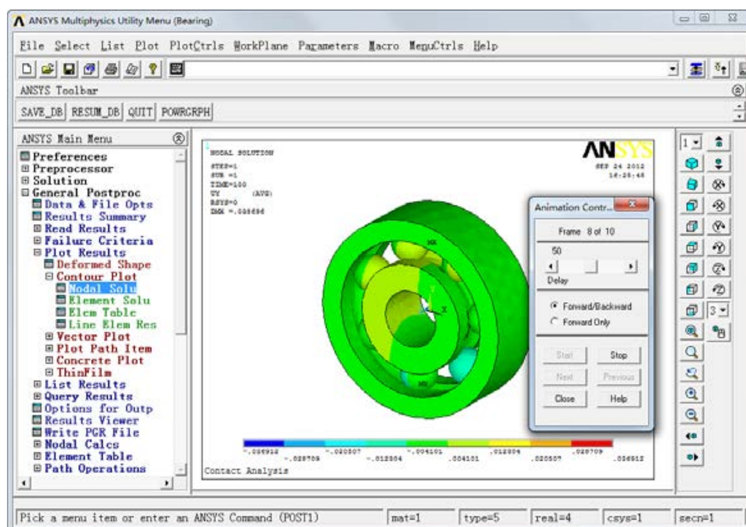


图 11-49 动画显示

第 12 章

瞬态动力学分析

瞬态动力学分析（亦称时间历程分析）用于确定承受任意随时间变化载荷的结构的动力学响应的方法。本章介绍了 ANSYS 瞬态动力学分析的全流程步骤，详细讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过阻尼振动系统的自由振动分析实例对 ANSYS 瞬态动力学分析功能进行了具体演示。

通过本章的学习，读者可以完整深入地掌握 ANSYS 瞬态动力学分析的各种功能和应用方法。

学 习 要 点

- 瞬态动力学概论
- 瞬态动力学的基本步骤
- 哥伦布阻尼的自由振动分析

12.1 瞬态动力学概论

可以用瞬态动力学分析确定结构在静载荷，瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力及力。载荷和时间的相关性使得惯性力和阻尼作用比较显著。如果惯性力和阻尼作用不重要，就可以用静力学分析代替瞬态分析。

瞬态动力学分析比静力学分析更复杂，因为按“工程”时间计算，瞬态动力学分析通常要占用更多的计算机资源和人力。可以先做一些预备工作以理解问题的物理意义，从而节省大量资源。例如：

首先分析一个比较简单的模型。由梁、质量体、弹簧组成的模型可以以最小的代价对问题提供有效深入地理解，简单模型或许正是确定结构所有的动力学响应所需要的。

如果分析中包含非线性，可以首先通过进行静力学分析尝试了解非线性特性如何影响结构的响应。有时在动力学分析中没必要包括非线性。

了解问题的动力学特性。通过做模态分析计算一下结构的固有频率和振型，便可了解当这些模态被激活时结构如何响应。固有频率同样对计算出正确的积分时间步长有用。

对于非线性问题，应考虑将模型的线性部分子结构化以降低分析代价。子结构在帮助文件中的“ANSYS Advanced Analysis Techniques Guide”里有详细的描述。

进行瞬态动力学分析可以采用 3 种方法：Full（完全法），Reduced（减缩法），Mode Superposition（模态叠加法）。下面比较一下各种方法的优缺点。

12.1.1 完全法（Full Method）

Full 法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应（没有矩阵减缩）。它是 3 种方法中功能最强的，允许包含各类非线性特性（塑性，大变形，大应变等）。Full 法的优点是：

（1）容易使用，因为不必关心如何选取主自由度和振型。

（2）允许包含各类非线性特性。

（3）使用完整矩阵，因此不涉及质量矩阵的近似。

（4）在一次处理过程中计算出所有的位移和应力。

（5）允许施加各种类型的载荷：节点力，外加的（非零）约束，单元载荷（压力和温度）。

（6）允许采用实体模型上所加的载荷。

Full 法的主要缺点是比其他方法开销大。

12.1.2 模态叠加法（Mode Superposition Method）

“Mode Superposition”法通过对模态分析得到的振型（特征值）乘上因子并求和来计算出结构的响应。它的优点是：

（1）对于许多问题，比“Reduced”或“Full”法更快且开销小。

（2）在模态分析中施加的载荷可以通过“LVSCALE”命令用于谐响应分析中。

（3）允许指定振型阻尼（阻尼系数为频率的函数）。

“Mode Superposition”法的缺点是：

（1）整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定，因此不允许用自动时间步长。

（2）唯一允许的非线性是点点接触（有间隙情形）。

（3）不能用于分析“未固定的（floating）”或不连续结构。

（4）不接受外加的非零位移。

（5）在模态分析中使用“PowerDynamics”法时，初始条件中不能有预加的载荷或位移。

12.1.3 减缩法（Reduced Method）

“Reduced”法通常采用主自由度和减缩矩阵来压缩问题的规模。主自由度处的位移被计算出来后，解可以被扩展到初始的完整 DOF 集上。

这种方法的优点是：比 Full 法更快且开销小。

“Reduced”法的缺点是：

（1）初始解只计算出主自由度的位移。要得到完整的位移，应力和力的解则需执行被称为扩展处理的进一步处理（扩展处理在某些分析应用中可能不必要）。

（2）不能施加单元载荷（压力，温度等），但允许由加速度。

（3）所有载荷必须施加在用户定义的自由度上（这就限制了采用实体模型上所加的载荷）。

（4）整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定，因此不允许用自动时间步长。

（5）唯一允许的非线性是点点接触（有间隙情形）。

12.2 瞬态动力学的基本步骤

首先将描述如何用“Full”法来进行瞬态动力学分析，然后会列出用“Reduced”法和“Mode Superposition”法时有差别的步骤。

Full 法瞬态动力学分析的过程由 8 个下述主要步骤组成。

12.2.1 前处理（建模和分网）

在这一步中需指定文件名和分析标题，然后用 PREP7 来定义单元类型，单元实常数，材料特性及几何模型。需要记住的要点：

（1）可以使用线性和非线性单元。

（2）必须指定弹性模量 EX（或某种形式的刚度）和密度 DENS（或某种形式的质

量）。材料特性可以是线性的，各向同性的或各向异性的，恒定的或和温度相关的。非线性材料特性将被忽略。另外，在划分网格时需记住以下几点：

（1）有限元网格需要足够精度以求解所关心的高阶模态。

（2）感兴趣的应力-应变区域的网格密度要比只关心位移的区域相对加密一些。

（3）如果求解过程包含了非线性特性，那么网格则应该与这些非线性特性相符合。例如，对于塑性分析来说，它要求在较大塑性变形梯度的平面内有一定的积分点密度，所以网格必须加密。

（4）如果关心弹性波的传播（例如杆的端部抖动），有限元网格至少要有足够的密度求解波，通常的准则是沿波的传播方向每个波长范围内至少要有 20 个网格。

12.2.2 建立初始条件

在进行瞬态动力学分析之前，必须清楚如何建立初始条件以及使用载荷步。从定义上来说，瞬态动力学包含按时间变化的载荷。为了指定这种载荷，需要将载荷-时间曲线分解成相应的载荷步，载荷-时间曲线上的每一个拐角都可以作为一个载荷步，如图 12-1 所示。

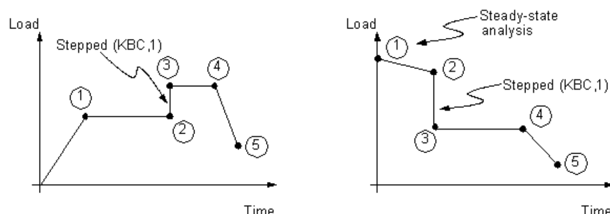


图 12-1 载荷-时间曲线

第一个载荷步通常被用来建立初始条件，然后要指定后继的瞬态载荷及加载步选项。对于每一个载荷步，都要指定载荷值和时间值，同时要指定其他的载荷步选项，如载荷是按“Stepped”还是按“Ramped”方式施加，是否使用自动时间步长等。最后将每一个载荷步写入文件并一次性求解所有的载荷步。

施加瞬态载荷的第一步是建立初始关系（即零时刻时的情况）。瞬态动力学分析要求给定两种初始条件：初始位移（u_0）和初始速度（$\dot{u}_0$）。如果没有进行特意设置，u_0 和 $\dot{u}_0$ 都被假定为 0。初始加速度（$\ddot{a}_0$）一般被假定为 0，但可以通过在一个小的时间间隔内施加合适的加速度载荷来指定非零的初始加速度。

非零初始位移及非零初始速度的设置：

命令：IC。

GUI：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define。



谨记不要给模型定义不一致的初始条件。比如说，如果在一个自由度（DOF）处定义了初始速度，而在其他所有自由度处均定义为 0，这显然就是一种潜在的互相冲突的初始条件。在多数情况下，可能需要在全部没有约束的自由度处定义初始条件，如

果这些初始条件在各个自由度处不相同，用 GUI 路径定义比用 IC 命令定义要容易得多。

12.2.3 设定求解控制器

该步骤跟静力结构分析是一样的，需特别指出的是：如果要建立初始条件，必须是在第一个载荷步上建立，然后可以在后续的载荷步中单独定义其余选项。

1．访问求解控制器（Solution Controls）

选择如下 GUI 路径进入求解控制器：

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Control，弹出“Solution Controls”对话框，如图 12-2 所示。

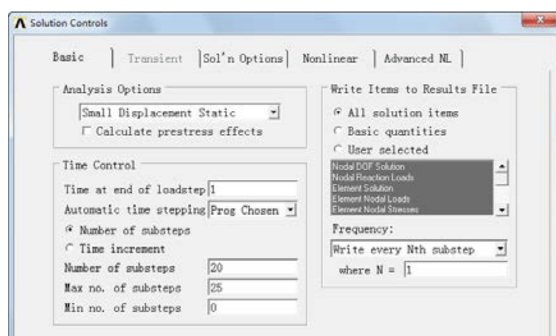


图 12-2　“Solution Controls”对话框

从图 12-2 中可以看到，该对话框主要包括 5 大块：基本选项（Basic）、瞬态选项（Transient）、求解选项（Sol’n Options）、非线性选项（Nonlinear）和高级非线性选项（Advanced NL）。

2．利用基本选项

当进入求解控制器时，基本选项（Basic）立即被激活。它的基本功能跟静力学一样，在瞬态动力学中，需特别指出如下几点：

在设置“ANTYPE”和 “NLGEOM”时，如果想开始一个新的分析并且忽略几何非线性（例如大转动、大挠度和大应变）的影响，那么选择“Small Displacement Transient”选项，如果要考虑几何非线性的影响（通常是受弯细长梁考虑大挠度或者是金属成型时考虑大应变），则选择“Large Displacement Transient” 选项。如果想重新开始一个失败的非线性分析或者是将刚做完的静力分析结果作为预应力或者刚做完瞬态动力学分析想要扩展其结果，选择“Restart Current Analysis” 选项。

在设置 AUTOTS 时，需记住该载荷步选项（通常被称为瞬态动力学最优化时间步）是根据结构的响应来确定是否开启。对于大多数结构而言，推荐打开自动调整时间步长选项，并利用 DELTIM 和 NSUBST 设定时间积分步的最大和最小值。



默认情况下，在瞬态动力学分析中，结果文件（Jobname.RST）只有最后一

个子步的数据。如果要记录所有子步的结果，重新设定 Frequency 的数值。另外，默认情况下，ANSYS 最多只允许在结果文件中写入 1000 个子步，超过时会报错，可以用命令“/CONFIG，NRES” 更改这个限定。

3．利用瞬态选项

ANSYS 求解控制器中包含的瞬态选项如表 12-1 所示。

表 12-1 瞬态（Transient）选项

选项	具体信息可参阅 ANSYS 帮助
指定是否考虑时间积分的影响 (TIMINT)	ANSYS Structural Analysis Guide 中的 Performing a Nonlinear Transient Analysis
指定在载荷步（或者子步）的载荷发生变化时是采用阶越载荷还是斜坡载荷 (KBC)	ANSYS Basic Analysis Guide 中的 Stepped Versus Ramped Loads ANSYS Basic Analysis Guide 中的 Stepping or Ramping Loads
指定质量阻尼和刚度阻尼(ALPHAD, BETAD)	ANSYS Structural Analysis Guide 中的 Damping
定义积分参数(TINTP)	ANSYS, Inc. Theory Reference

在瞬态动力学中，需特别指出的是如下几点：

（1）TIMINT，该动态载荷选项表示是否考虑时间积分的影响。当考虑惯性力和阻尼时，必须考虑时间积分的影响（否则，ANSYS 只会给出静力分析解），所以默认情况下，该选项就是打开的。从静力学分析的结果开始瞬态动力学分析时，该选项特别有用，也就是说，第一个载荷步不考虑时间积分的影响。

（2）ALPHAD (alpha 表示质量阻尼) 和 BETA(beta 表示刚度阻尼) ，该动态载荷选项表示阻尼项。很多时候，阻尼是已知的而且不可忽略的，所以必须考虑。

（3）TINTP，该动态载荷选项表示瞬态积分参数，用于 Newmark 时间积分方法。

4．利用其他选项

该求解控制器中还包含其他选项，诸如求解选项（Sol’n Options）、非线性选项（Nonlinear）和高级非线性选项（Advanced NL），它们跟静力分析是一样的，该处不再赘述。需强调的是，瞬态动力学分析中不能采用弧长法（arc-length）。

12.2.4 设定其他求解选项

在瞬态动力学中的其他求解选项（比如应力刚化效应、牛顿-拉夫森（Newton-Raphson）选项、蠕变选项、输出控制选项、结果外推选项）跟静力学是一样的，与静力学不同的是如下几项：

1．预应力影响（Prestress Effects）

ANSYS 允许在分析中包含预应力，比如可以将先前的静力分析或者动力分析结果作为预应力施加到当前分析上，它要求必须存在先前结果文件。

命令：PSTRES。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options。

2．阻尼选项（Damping Option）

利用该选项加入阻尼。在大多数情况下，阻尼是已知的，不能忽略。可以在瞬态动力学分析中设置如下几种阻尼形式：

（1）材料阻尼（MP,DAMP）。

（2）单元阻尼（COMBIN7 等)。

施加材料阻尼的方法如下：

命令：MP,DAMP。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Other > Change Mat Props > Material Models > Structural > Damping。

3．质量阵的形式（Mass Matrix Formulation）

利用该选项指定使用集中质量矩阵。通常，ANSYS 推荐使用默认选项（协调质量矩阵），但对于包含薄膜构件（例如细长梁或者薄板等）的结构，集中质量矩阵往往能得到更好的结果。同时，使用集中质量矩阵也可以缩短求解时间和降低求解内存。

命令：LUMPM。

GUI：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > Analysis Options。

12.2.5 施加载荷

表 12-2 概括了适用于瞬态动力学分析的载荷类型。除惯性载荷外，可以在实体模型（由关键点，线，面组成）或有限元模型（由节点和单元组成）上施加载荷。

表 12-2 瞬态动力学分析中可施加的载荷

载荷形式	范畴	命令	GUI 路径
位移约束（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY, ROTZ）	约束	D	Main Menu > Solution > DefineLoads > Apply > Structural > Displacement
集中力或者力矩 （FX，FY，FZ，MX, MY, MZ）	力	F	Main Menu > Solution > DefineLoads > Apply > Structural > Force/Moment
压力（PRES）	面载荷	SF	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure
温度（TEMP），流体（FLUE）	体载荷	BF	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature
重力，向心力等	惯性载荷	-	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Other

在分析过程中，可以施加，删除载荷或对载荷进行操作或列表。

表 12-3 所示概括了瞬态动力学分析中可用的载荷步选项。

12.2.6 设定多载荷步

重复以上步骤，可定义多载荷步，对于每一个载荷步，都可以根据需要重新设定载荷求解控制和选项，并且可以将所有信息写入文件。

表 12-3 载荷步选项

选项	命令	GUI 途径
普通选项（General Options）		
时间	TIME	Main Menu >Solution>Load Step Opts > Time/Frequenc > Time - Time Step
阶跃载荷或者倾斜载荷	KBC	MainMenu > Solution > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Time-Time Step or Freq and Substeps
积分时间步长	NSUBST DELTIM	Main Menu>Solution >Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps
开关自动调整时间步长	AUTOTS	Main Menu>Solution >Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps
动力学选项（Dynamics Options）		
时间积分影响	TIMINT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration > Newmark Parameters
瞬态时间积分参数（用于 Newmark 方法）	TINPT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration > Newmark Parameters
阻尼	ALPHAD BETAD DMPRAT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
非线性选项(Nonlinear Option)		
最多迭代次数	NEQIT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter
迭代收敛精度	CNVTOL	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Transient
预测校正选项	PRED	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Predictor
线性搜索选项	LNSRCH	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > LineSearch
蠕变选项	CRPLIM	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Creep Criterion
终止求解选项	NCNV	Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Advanced NL
输出控制选项（Output Control Options）		
输出控制	OUTPR	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout
数据库和结果文件	OUTRES	Main Menu >Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/ Results File
结果外推	ERESX	Main Menu >Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Integration Pt

在每一个载荷步中，可以重新设定的载荷步选项包括：TIMINT，TINTP，ALPHAD，BETAD, MP,DAMP, TIME, KBC, NSUBST, DELTIM, AUTOTS, NEQIT, CNVTOL, PRED, LNSRCH，CRPLIM，NCNV，CUTCONTROL，OUTPR，OUTRES，ERESX 和 RESCONTROL。

保存当前载荷步设置到载荷步文件中。

命令：LSWRITE。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File。

下面给出一个载荷步操作的命令流示例：

```
TIME, ...            ! Time at the end of 1st transient load step
Loads   ...          ! Load values at above time
KBC, ...             ! Stepped or ramped loads
LSWRITE              ! Write load data to load step file
TIME, ...            ! Time at the end of 2nd transient load step
Loads   ...          ! Load values at above time
KBC, ...             ! Stepped or ramped loads
LSWRITE              ! Write load data to load step file
TIME, ...            ! Time at the end of 3rd transient load step
Loads   ...          ! Load values at above time
KBC, ...             ! Stepped or ramped loads
LSWRITE              ! Write load data to load step file
Etc.
```

12.2.7 瞬态求解

（1）只求解当前载荷步：

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

（2）求解多载荷步：

命令：LSSOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > From LS Files。

12.2.8 后处理

瞬态动力学分析的结果被保存到结构分析结果文件 Jobname.RST 中。可以用 POST26 和 POST1 观察结果。

POST26 用于观察模型中指定点处呈现为时间函数的结果。

POST1 用于观察在给定时间整个模型的结果。

1．使用 POST26

POST26 要用到结果项/频率对应关系表，即“variables”（变量）。每一个变量都有一个参考号，1 号变量被内定为频率。

（1）用以下选项定义变量：

命令：NSOL 用于定义基本数据（节点位移）。

ESOL 用于定义派生数据（单元数据，如应力）。

RFORCE 用于定义反作用力数据。

FORCE（合力，或合力的静力分量，阻尼分量，惯性力分量）。

SOLU（时间步长，平衡迭代次数，响应频率等）。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables。

 在 Reduced 法或 Mode Superposition 法中，用命令 FORCE 只能得到静力。

（2）绘制变量变化曲线或列出变量值。通过观察整个模型关键点处的时间历程分析结果，就可以找到用于进一步的 POST1 后处理的临界时间点。

命令：PLVAR（绘制变量变化曲线）。

PLVAR，EXTREM（变量值列表）。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Graph Variables。

Main Menu > TimeHist Postpro > List Variables。

Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes。

2．使用 POST1

（1）从数据文件中读入模型数据。

命令：RESUME。

GUI：Utility Menu > File > Resume from。

（2）读入需要的结果集：用 SET 命令根据载荷步及子步序号或根据时间数值指定数据集。

命令：SET。

GUI：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Time/Freq。

 如果指定的时刻没有可用结果，得到的结果将是和该时刻相距最近的两个时间点对应结果之间的线性插值。

（3）显示结构的变形状况，应力，应变等的等值线，或者向量的向量图[PLVECT]。要得到数据的列表表格，请用 PRNSOL，PRESOL，PRRSOL 等。

显示变形形状：

命令：PLDISP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

显示变形云图：

命令： PLNSOL 或 PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu or Element Solu。

 在 PLNSOL 和 PLESOL 命令的 KUND 参数可用来选择是否将未变形的形状叠加到显示结果中。

显示反作用力和力矩：

命令：PRRSOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu。

显示节点力和力矩：

命令：PRESOL，F 或 M。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。

可以列出选定的一组节点的总节点力和总力矩。这样，就可以选定一组节点并得到作用在这些节点上的总力的大小，命令方式和 GUI 方式如下：

命令：FSUM。

GUI：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Total Force Sum。

同样，也可以察看每个选定节点处的总力和总力矩。对于处于平衡态的物体，除非存在外加的载荷或反作用载荷，所有节点处的总载荷应该为零。命令和 GUI 如下：

命令：NFORCE。

GUI：Main Menu > General Postproc > Nodal Calcs > Sum @ Each Node。

还可以设置要观察的是力的哪个分量：合力（默认），静力分量，阻尼力分量，惯性力分量。命令如下：

命令：FORCE。

GUI：Main Menu > General Postproc > Options for Outp。

显示线单元（例如梁单元）结果：

命令：ETABLE。

GUI：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table。

对于线单元，如梁单元，杆单元，及管单元，用此选项可得到派生数据（应力，应变等）。细节可查阅 ETABLE 命令。

绘制矢量图：

命令：PLVECT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined。

列表显示结果：

命令：PRNSOL（节点结果）。

PRESOL（单元－单元结果）。

PRRSOL（反作用力数据）等。

NSORT，ESORT（对数据进行排序）。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Nodes。

12.3 实例导航——哥伦布阻尼的自由振动分析

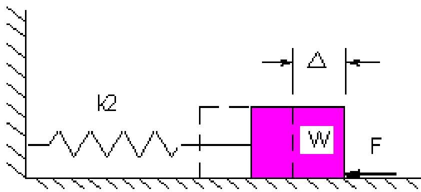
在此例中，有一个集中质量块的钢梁受到动力载荷作用，用完全法（full method）来执行动力响应分析，确定一个随时间变化载荷作用的瞬态响应。

12.3.1 问题描述

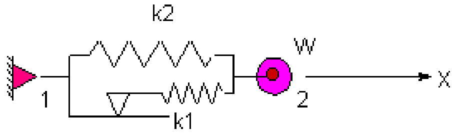
一个有哥伦布阻尼的弹簧-质量块系统，如图 12-3 所示，质量块被移动 Δ 位移然后释放。假定表面摩擦力是一个滑动常阻力 F，求系统的位移时间关系。表 12-4 给出了问题的材料属性以及载荷条件和初始条件（采用英制单位）。

表 12-4 材料属性、载荷以及初始条件

材料属性	载荷	初始条件		
W = 10 lb	Δ = -1 in		X	v_0
k2 = 30 lb/in	F = 1.875 lb	t=0	-1	0.0
m = W/g				



模型简图



有限元简图

图 12-3 模型简图

12.3.2 GUI模式

01 前处理（建模及分网）。

❶定义工作标题：Utility Menu > File > Change Title，弹出“Change Title”对话框，输入“FREE VIBRATION WITH COULOMB DAMPING”，如图 12-4 所示，然后单击“OK”按钮。

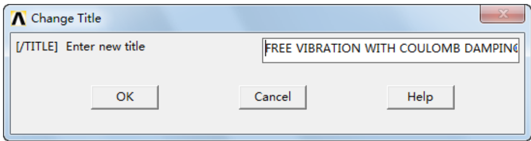


图 12-4 定义工作标题

❷定义单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”对话框，如图 12-5 所示，单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在左面列表框中选择“Combination”，在右面的列表框中选中“Combination 40”，如图 12-6 所示，单击“OK”按钮，回到图 12-5 所示的对话框。

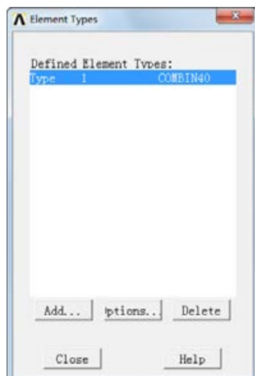


图 12-5 “Element Types”对话框

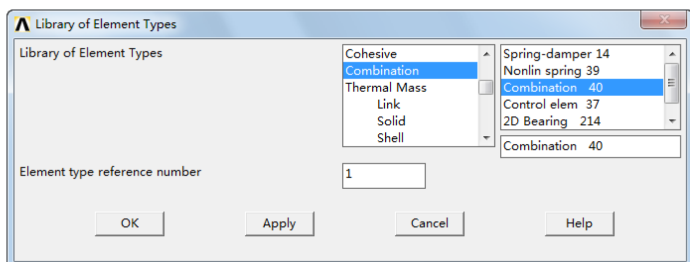


图 12-6 “Library of Element Types”对话框

❸定义单元选项：在图 12-5 所示的对话框中单击“Options”按钮，弹出“COMBIN40 element type options”对话框，如图 12-7 所示，在“Element degree(s) of freedom K3”后面的下拉列表中选择“UX”，在“Mass location K6”后面的下拉列表中选择“Mass at node J”，如图 12-7 所示，单击“OK”按钮，回到图 12-5 所示的对话框。单击“Close”按钮关闭该对话框。

❹定义第一种实常数：Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，弹出“Real Constants”对话框，如图 12-8 所示，单击“Add”按钮，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，如图 12-9 所示。

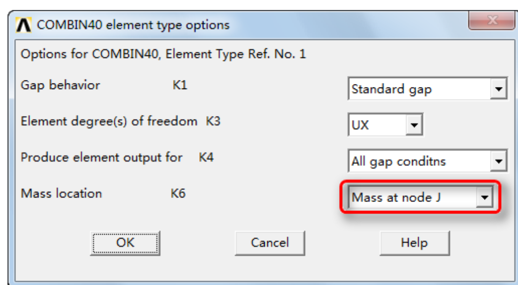


图 12-7 “COMBIN40 element type options”对话框

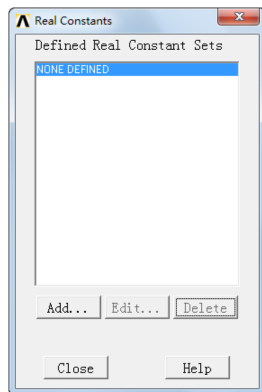


图 12-8 “Real Constant”对话框

❺在如图 12-9 所示的对话框中选取“Type 1 COMBIN40”，单击“OK”按钮，出现“Real Constants Set Number1，for COMBIN40”对话框，在“Spring constant K1”文本框中输入 10000，在“Mass M”文本框中输入 10/386，在“Limiting sliding force FSLIDE”文本框中输入 1.875，在“Spring const （par to slide）K2”文本框中输入 30，如图 12-10 所示，单击“OK”按钮。接着单击“Real Constants”对话框的“Close”按钮关闭该对话框，退出实常数定义。

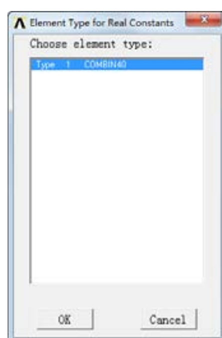


图 12-9 “Element Type for Real Constants“对话框

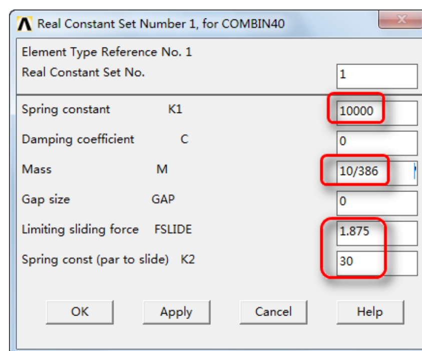


图 12-10 “Real Constants Set Number1，for COMBIN40”对话框

❻创建节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”文本框中输入 1，如图 12-11 所示。在“X,Y,Z Location in active CS”文本框中输入“0、0、0”，单击“Apply”按钮。



图 12-11 生成第一个节点

❼在“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框中，在“NODE Node number”文本框中输入 2，在“X,Y,Z Location in active CS”文本框中输入“1、0、0”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 12-12 所示。

❽打开节点编号显示控制：Utility Menu > PlotCtrls > Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，单击“NODE Node numbers”复选框使其显示为“On”，如图 12-13 所示，单击“OK”按钮。

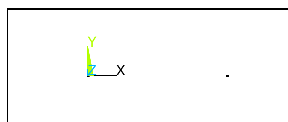


图 12-12 节点显示

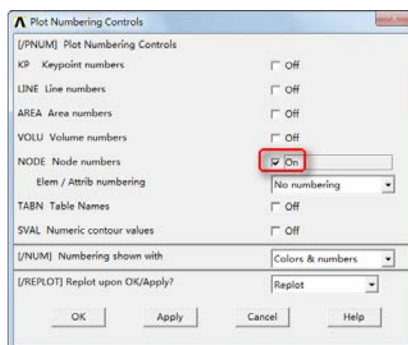


图 12-13 打开节点编号显示控制

❾选择菜单路径：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options，弹出“Window Options”对话框，在“[/TRIAD] Location of triad”下拉列表中选择“At top left”，如图 12-14 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

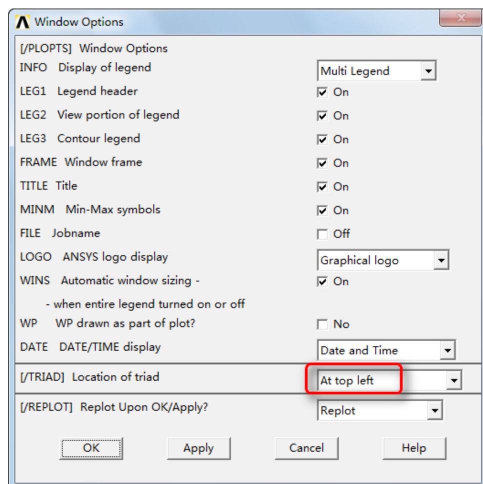


图 12-14 “Window Options”对话框

❿定义梁单元属性：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes，弹出“Elements Attributes”对话框，在“[TYPE] Element type number”下拉列表中选择“1 COMBIN40”，在“[REAL] Real constant set number”下拉列表中选择 1，如图 12-15 所示。

⓫创建梁单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，弹出“Elements from Nodes”拾取菜单。用鼠标在屏幕上拾取编号为 1 和 2 的节点，单击“OK”按钮，屏幕上在节点 1 和节点 2 之间出现一条直线。此时屏幕显示如图 12-16 所示。

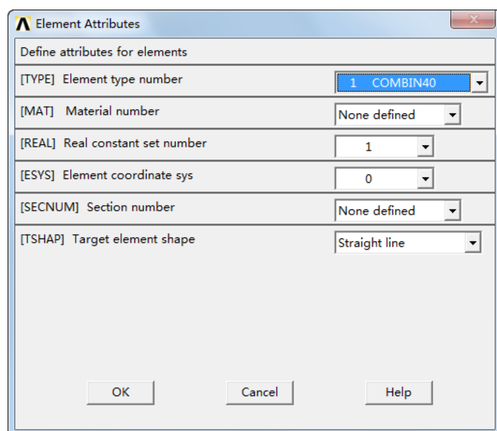


图 12-15 “Elements Attributes”对话框

02 建立初始条件。定义初始位移和速度：Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define，弹出“Define Initial Conditions”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取编号为“2”的节点，单击“OK”按钮，弹出“Define Initial Conditions”对话框，如图 12-17 所示，在“Lab DOF to be specified”后面的下拉列表中选择“UX”，在“VALUE Initial value of DOF”文本框中输入-1，在“VALUE2 Initial velocity”文本框中输入 0，单击“OK”按钮。

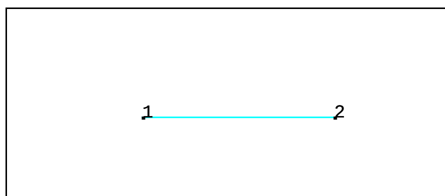


图 12-16 单元模型

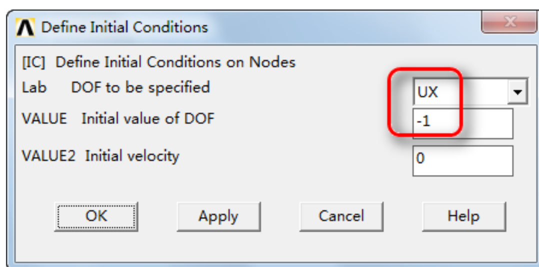


图 12-17 “Define Initial Conditions”对话框



如果在 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply 路径下没有找到“Initial Condit'n”项，可以先选择 Main Menu > Solution > Unabridged Menu 路径显示所有可能的菜单，然后再执行 Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define。另外，定义初始位移和初始速度还有一条路径：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define，它跟上面的做法是完全等效的。

03 设定求解类型和求解控制器。

❶定义求解类型：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis。“New Analysis”对话框出现，选中“Transient”，如图 12-18 所示，单击“OK”按钮，弹出“Transient Analysis”对话框，如图 12-19 所示，在“[TRNOPT] Solution Method”后面选中“Full”单选按钮（通常它也是默认选项），单击“OK”按钮。

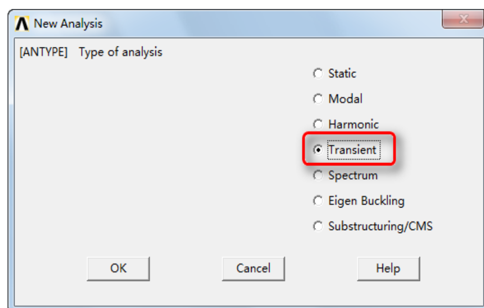


图 12-18 “New Analysis”对话框出现

❷设置求解控制器：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol’n Controls，弹出

“Solution Controls”对话框（求解控制器），如图 12-20 所示，在“Time at end of loadstep”文本框中输入 0.2025，在“Automatic time stepping”下拉列表中选择“Off”，在“Time controls”下面单击选择“Number of substeps”，在“Number of substeps”文本框中输入 404，在“Write items to results file”下面单击选择“All solution items”，在“Frequency”下拉列表中选择“Write every substeps”。

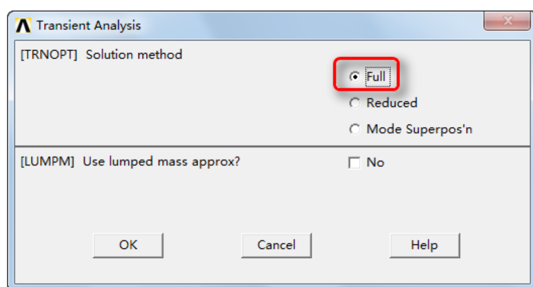


图 12-19 “Transient Analysis”对话框

❸在图 12-20 所示的对话框中，单击“Nonlinear”标签，弹出“Nonlinear”选项卡如图 12-21 所示。

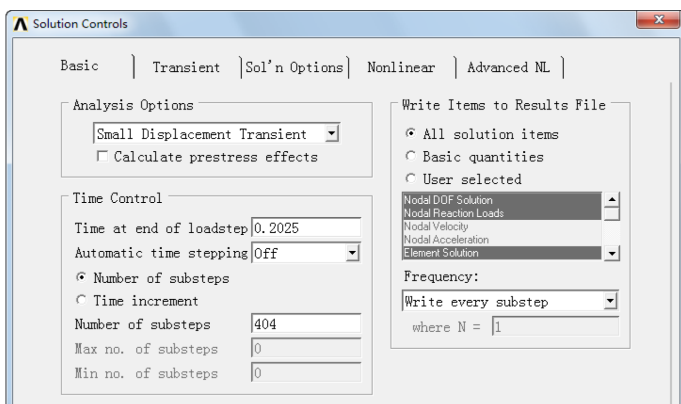


图 12-20 “Solution Controls”对话框（Basic 项）

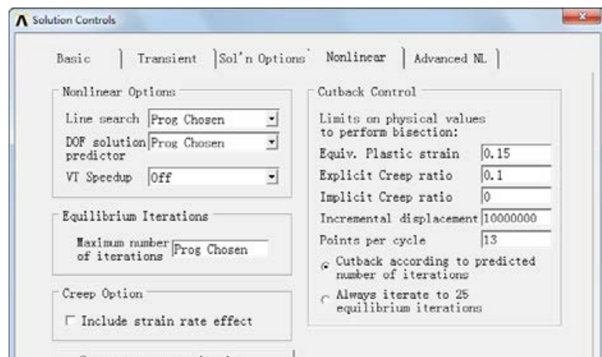


图 12-21 “Solution Controls”对话框（Nonlinear 项）

❹在“Nonlinear”选项卡中单击“Set convergence criteria”按钮，弹出“Nonlinear Convergence Criteria”工具框，如图 12-22 所示。

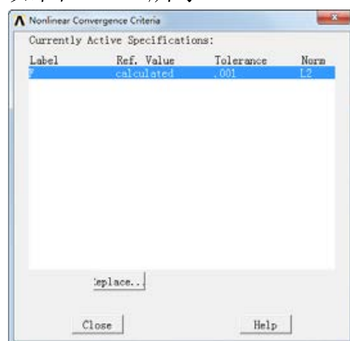


图 12-22 “Nonlinear Convergence Criteria ”工具框

❺单击“Replace”按钮，弹出“Nonlinear Convergence Criteria”对话框，如图 12-23 所示，在“Lab Convergence is based on”右面的第一列表框中单击选择“Structural”，在第二列表框中单击选择“Force F”，在“VALUE Reference value of lab”文本框中输入 1，在“TOLER Tolerance about VALUE”文本框中输入“0.001”，单击“OK”按钮接受其他默认设置，返回到图 12-22 所示的工具框，单击“Close”按钮，返回到图 12-21 所示的选项卡，单击“OK”按钮。

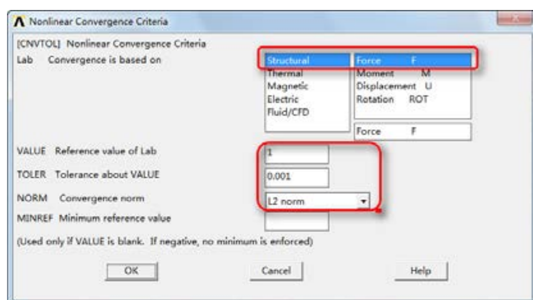


图 12-23 “Nonlinear Convergence Criteria”对话框

04 设定其他求解选项。

❶关闭优化设置：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Load Step Opts > Solution Ctrl，弹出“Nonlinear Solution Controls”对话框，在“[SOLCONTROL] Solution Control”后面选择“Off”，如图 12-24 所示，单击“OK”按钮。

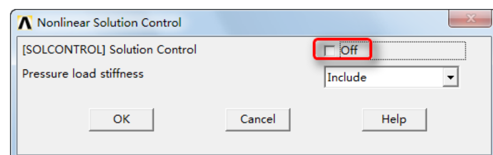


图 12-24 “Nonlinear Solution Controls”对话框

❷设置载荷和约束类型（阶跃或者倾斜）：Main Menu > Solution > Load Step Opts >

Time/Frequenc > Time and Substps，弹出“Time and Substeps Options”对话框，如图 12-25 所示，在“[KBC] Stepped or ramped b.c. ”后面选择“stepped”，单击 OK 接受其他设置。

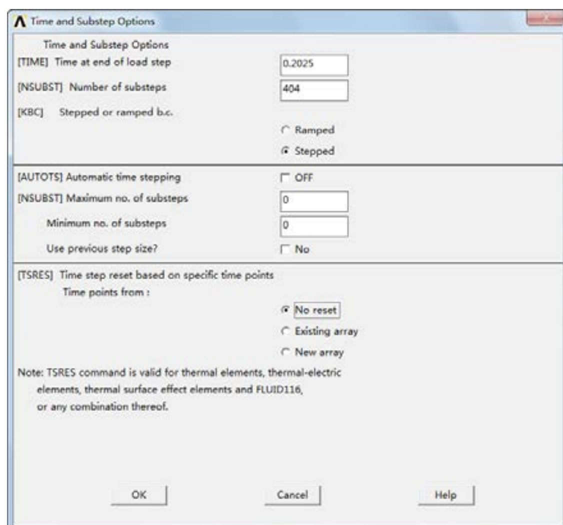


图 12-25 “Time and Substeps Options”对话框

05 施加载荷和约束。

施加约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取编号为 1 的节点，单击“OK”按钮，弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”后面的列表中选择“UX”，如图 12-26 所示，单击“OK”按钮。

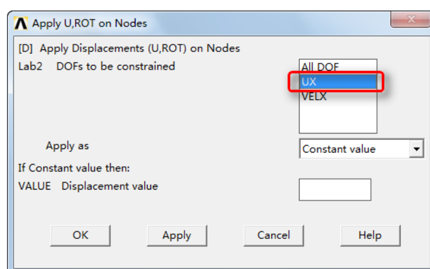


图 12-26 “Apply U,ROT on Nodes“对话框

06 瞬态求解。

❶瞬态分析求解： Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示栏和“Solve Current Load Step”对话框。浏览信息提示栏中的信息，如果无误，则单击 File > Close 关闭之。单击“Solve Current Load Step”对话框的“OK”按钮，开始求解。

❷当求解结束时，会弹出“Solution is done”的提示框，单击“OK”按钮。此时屏

幕显示求解迭代进程，如图 12-27 所示。

❸退出求解器：Main Menu > Finish。

07 观察结果（后处理）。

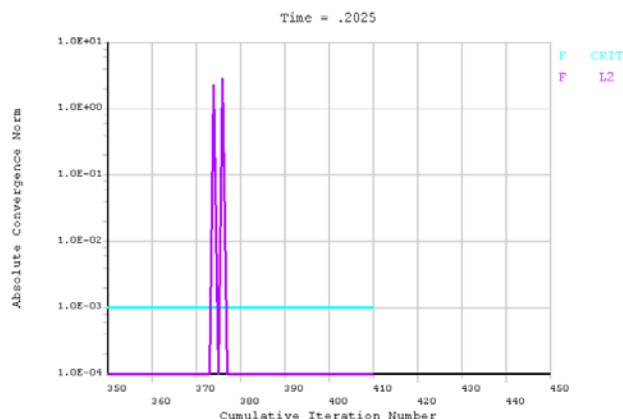


图 12-27 求解迭代进程

❶进入时间历程后处理：Main Menu > TimeHist PostPro，弹出如图 12-28 所示的“Time History Variables ”对话框，里面已有默认变量时间（TIME）。

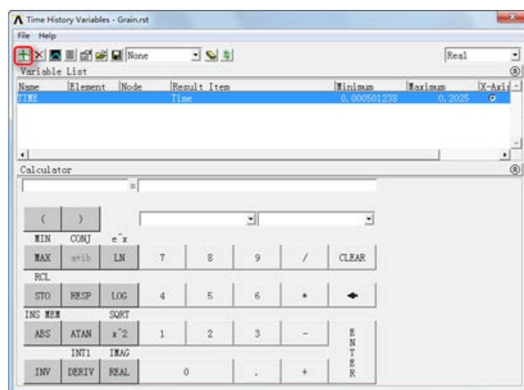


图 12-28 “Time History Variables“对话框

❷定义位移变量“UX”：在如图 12-28 所示的对话框中单击左上角的“＋”按钮，弹出“Add Time-History Variables”对话框，连续单击 Nodal Solution > DOF Solution > X-Component of displacement，如图 12-29 所示，在“Variable Name”后面输入“UX-2”，单击“OK”按钮。

❸弹出“Node for Data“拾取菜单，如图 12-30 所示，在拾取菜单文本框中输入 2，单击“OK”按钮，返回到“Time History Variables“对话框，不过此时变量列表里面多了一项 UX 变量。

❹定义应力变量 F1：在如图 12-28 所示的对话框中单击左上角的“＋”按钮，弹出如图 12-29 所示对话框，在该对话框中连续单击 Element Solution > Miscellaneous Items >

Summable data（SMISC,1），弹出“Miscellaneous Sequence Number”对话框，如图 12-31 所示。在“Sequence number SMIS”后面输入 1，单击“OK”按钮。返回到如图 12-32 所示的“Add Time-History Variables”对话框，在“Variable Name”文本框中输入“F1”，单击“OK”按钮。

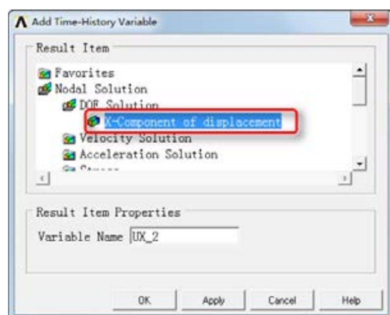
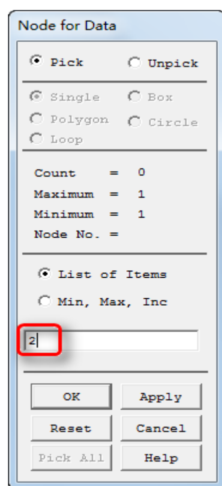


图 12-29 “Add Time-History Variables”对话框



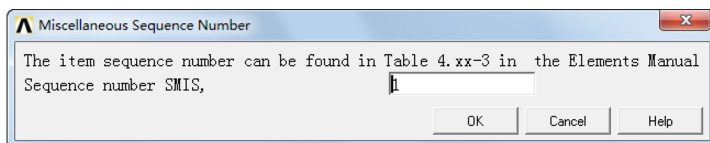


图 12-30 “Node for Data”拾取菜单　　图 12-31 “Miscellaneous Sequence Number”对话框

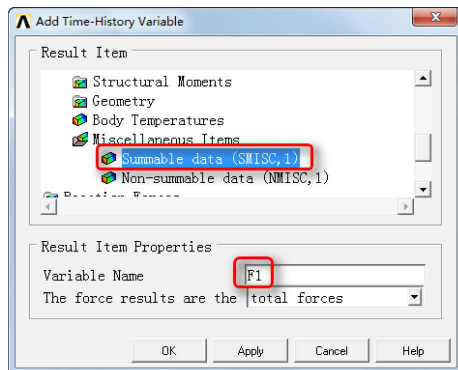


图 12-32 “Add Time-History Variables”对话框

❺弹出“Element for Data”拾取菜单，在文本框中输入 1（或者用鼠标在屏幕上拾取单元），单击“OK”按钮，弹出“Node for Data”拾取菜单，在输入框中输入 1（或者用鼠标在屏幕上拾取编号为 1 的节点），单击“OK”按钮，返回“Time History Variables”对话框，不过此时“Variable List”下增加了两个变量：UX 和 F1，如图 12-33 所示。

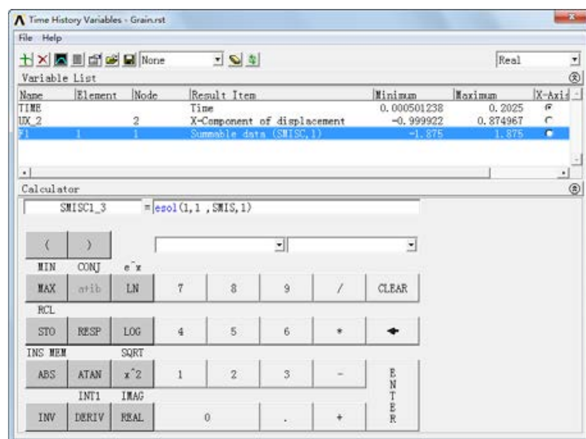


图 12-33 “Time History Variables”对话框

❻设置坐标 1：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Grid，弹出“Grid Modifications for Graph Plots”对话框，在“[/GRID] Type of grid”后面的下拉列表中选择“X and Y lines”，如图 12-34 所示，单击“OK”按钮。

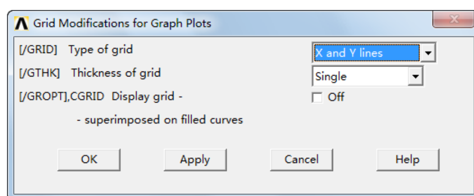


图 12-34 “Grid Modifications for Graph Plots”对话框

❼设置坐标 2：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes，弹出“Axes Modifications for Graph Plots”对话框，在“[/AXLAB] Y-axis label”文本框中输入“DISP”，如图 12-35 所示，单击“OK”按钮。

❽设置坐标 3：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Curve，弹出“Curve Modifications for Graph Plots”对话框，如图 12-36 所示，在“[/GTHK] Thickness of curves”后面的下拉列表中选择“Double”，单击“OK”按钮。

❾绘制 UX 变量图：Main Menu > TimeHist PostPro > Graph Variables，弹出“Graph Time-History Variables”对话框。如图 12-37 所示。在“NVAR1”后面输入 2，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 12-38 所示。

❿重新设置坐标轴标号：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes，弹出如图 12-35 所示对话框，在“[/AXLAB] Y-axis label”后面输入“FORCE”，单击“OK”

按钮。

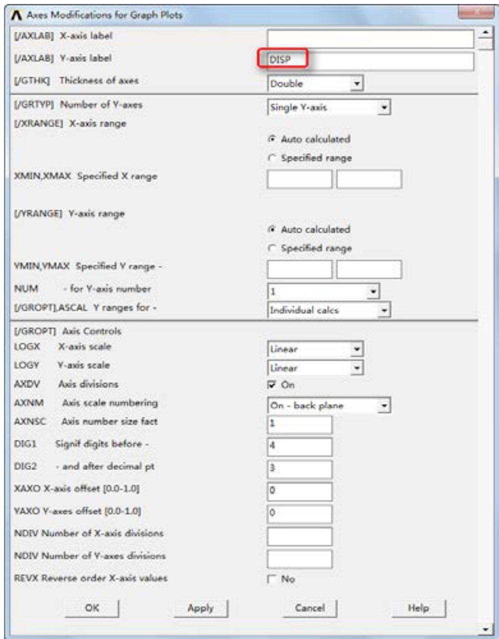


图 12-35 “Axes Modifications for Graph Plots”对话框

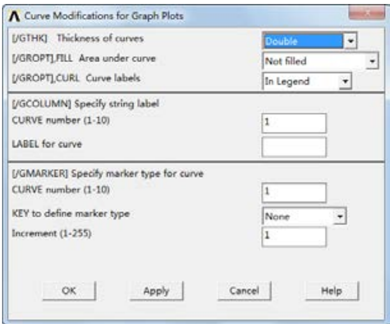


图 12-36 “Curve Modifications for Graph Plots”对话框

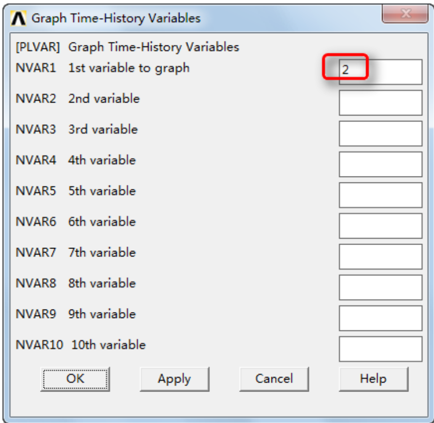


图 12-37 “Graph Time-History Variables”对话框

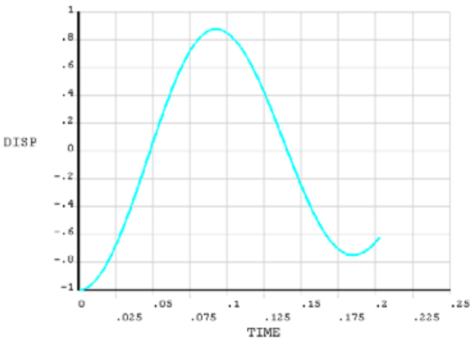


图 12-38 位移时间图曲线

⓫绘制 F1 变量图：Main Menu > TimeHist PostPro > Graph Variables，弹出“Graph Time-History Variables”对话框，如图 12-37 所示。在“NVAR1”后面输入 3，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 12-39 所示。

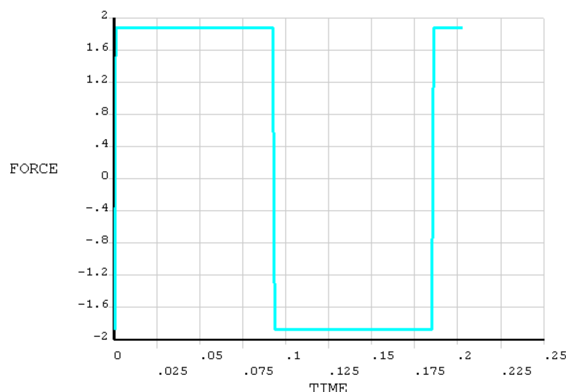


图 12-39 应力时间曲线

⓬列表显示变量：Main Menu > TimeHist PostPro > List Variables，弹出“List Time-History Variables”对话框，如图 12-40 所示，在“NVAR1”后面输入 2，在“NVAR2”后面输入 3，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 12-41 所示。

⓭退出 ANSYS：在“ANAYS Toolbar”中单击“Quit”，选择要保存的项后单击“OK”按钮。

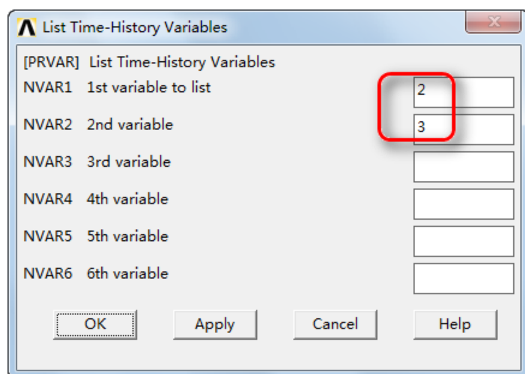


图 12-40 “List Time-History Variables”对话框

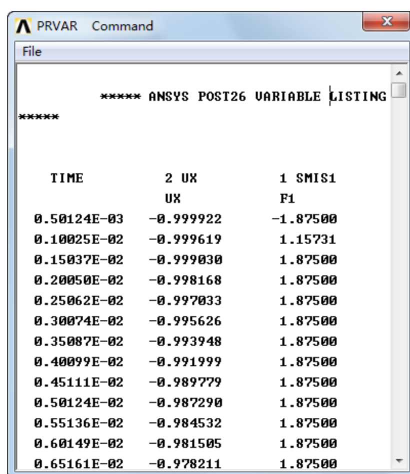


图 12-41 列表显示变量

12.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 13 章

谱分析

谱分析是模态分析的扩展，用于计算结构对地震及其他随机激励的响应。本章介绍了 ANSYS 谱分析的全流程，讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过支撑平板的动力效果分析实例对 ANSYS 谱分析功能进行了具体演示。

通过本章的学习，读者可以完整深入地掌握 ANSYS 谱分析的各种功能和应用方法。

学习要点

- 谱分析概论
- 谱分析的基本步骤
- 支撑平板的动力效果分析

13.1 谱分析概论

谱是指频率与谱值的曲线，它表征时间历程载荷的频率和强度特征。谱分析包括：

（1）响应谱：单点响应谱（SPRS）和多点响应谱（MPRS）。

（2）动力设计分析方法（DDAM）。

（3）功率谱密度（PSD）。

13.1.1 响应谱

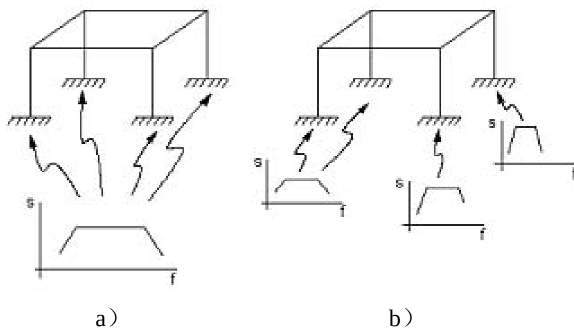
响应谱表示单自由度系统对时间历程载荷的响应，它是响应与频率的曲线，这里的响应可以是位移、速度、加速度或者力。响应谱包括两种：

1. 单点响应谱（SPRS）

在单点响应谱分析（SPRS）中，只可以给节点指定一种谱曲线（或者一族谱曲线），例如在支撑处指定一种谱曲线，如图 13-1a 所示。

2. 多点响应谱（MPRS）

在多点响应谱分析（MPRS）中可在不同节点处指定不同的谱曲线，如图 13-1b 所示。



a） b）

图 13-1 响应谱分析示意图

S—谱值 f—频率

13.1.2 动力设计分析方法（DDAM）

该方法是一种用于分析船装备抗振性的技术，它本质上来说也是一种响应谱分析，该方法中用到的谱曲线是根据一系列经验公式和美国海军研究实验报告（NRL-1396）所提供的抗振设计表格得到的。

13.1.3 功率谱密度（PSD）

功率谱密度（PSD）是针对随机变量在均方意义上的统计方法，用于随机振动分析，

此时，响应的瞬态数值只能用概率函数来表示，其数值的概率对应一个精确值。

功率密度函数表示功率谱密度值与频率的曲线，这里的功率谱可以是位移功率谱、速度功率谱、加速度功率谱或者力功率谱。从数学意义上来说，功率谱密度与频率所围成的面积就等于方差。跟响应谱分析类似，随机振动分析也可以是单点或者多点。对于单点随机振动分析，在模型的一组节点处指定一种功率谱密度；对于多点随机振动分析，可以在模型不同节点处指定不同的功率谱密度。

13.2 谱分析的基本步骤

13.2.1 前处理

该步骤跟普通结构静力分析一样，不过需注意以下两点：

（1）在谱分析中只有线性行为有效。如果有非线性单元存在，将作为线性来考虑。举例来说，如果分析中包括接触单元，它们的刚度将依据原始状态来计算并且之后就不再改变。

（2）必须指定弹性模量（EX）（或者是某种形式的刚度）和密度（DENS）（或某种形式的质量）。材料属性可以是线性的，各向同性或者各向异性的，与温度无关或者有关。如果定义了非线性材料属性，其非线性将被忽略。

13.2.2 模态分析

谱分析之前需进行模态分析（包括自振频率和固有模态），其具体步骤可参考模态分析章节，不过需注意以下几点：

（1）提取模态可以用兰索斯方法（Block Lanczos）、自空间法或者减缩方法，其他的方法诸如非对称法、阻尼法、QR 阻尼法和 PowerDynamics 法不能用于后来的谱分析。

（2）提取的模态阶数必须足够描述所关心频率范围内的结构响应特性。

（3）如果想用一个单独的步骤来扩展模态，那么使用 GUI 分析时在弹出的对话框中要选择不扩展模态[MODOPT]（参考 MXPAND 命令的 SIGNIF 变量）。否则，在模态分析时就选择扩展模态。

（4）如果谱分析中包括与材料相关的阻尼，必须在模态分析时指定。

（5）确定约束住打算施加激励谱的自由度。

（6）在求解结束后，需明确的离开求解器[FINISH]。

13.2.3 谱分析

从模态分析得到的模态文件和全部文件（jobname.MODE, jobname.FULL）必须存在

且有效，数据库中必须包含相同的结构模型。

1. 进入求解器

命令：/SOLU。

GUI：Main Menu > Solution。

2. 定义分析类型和选项

ANSYS 程序为谱分析提供了如表 13-1 选项，须注意的，并不是所有模态分析选项和特征值提取方法都可用于谱分析。

表 13-1 分析类型和选项

选项	命令	GUI 路径
新的分析	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis
分析类型：谱分析	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Spectrum
谱分析类型：SPRS	SPOPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
提取的模态阶数	SPOPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

（1）选项：New Analysis [ANTYPE]。选择“New Analysis”。

（2）选项：Analysis Type: Spectrum [ANTYPE]。选择“spectrum”（谱分析）。

（3）选项：Spectrum Type [SPOPT]。可供选择项有“Single-point Response Spectrum ”(SPRS)（单点响应谱），“Multi-pt response”（MPRS）（多点响应谱），“D. D. A. M”（动力设计分析）和“P. S. D”（功率谱密度），如图 13-2 所示。这其实就是选择谱分析的方法，针对不同的谱分析方法，后面的载荷步选项也不相同。

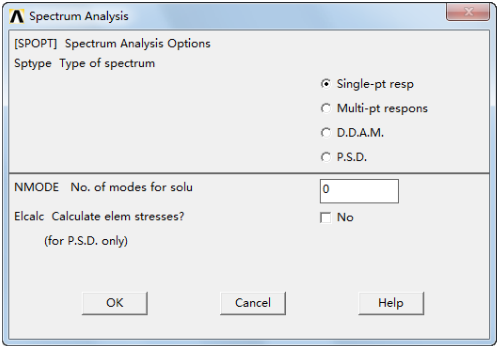


图 13-2 谱分析选项

（4）提取的模态阶数[SPOPT]。提取足够的模态，要可以覆盖谱分析所跨越的频率范围，这样才可以描述结构的响应特征。求解的精度依赖于模态的提取阶数：提取阶数越多，求解精度越高，该项对应于图 13-2 中的“NMODE No. of modes for solu”。如果想计算相对应力，在“SPOPT”命令里选择“YES”，对应于图 13-2 中的“Elcalc Calculate elem stresses”。

3. 指定载荷步选项

表 13-2 给出对于单点响应谱分析有效的载荷步选项。

表 13-2 载荷步选项

选项	命令	GUI 路径
		谱分析选项
响应谱的类型	SVTYP	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > Single Point > Settings
直接激励	SED	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > Single Point > Settings
谱值与频率的曲线	FREQ, SV	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > Single Point > Freq Table or Spectr Values
		阻尼（动力学选项）
刚度阻尼	BETAD	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
阻尼比常数	DMPRAT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
模态阻尼	MDAMP	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping

（1）响应谱的类型[SVTYP]。如图 13-3 所示，响应谱的类型（Type of response spectr）可以是位移、速度、加速度、力或者功率谱。除了力之外，其余都可以表示地震谱，也就是说，它们都假定作用于基础上（即约束处）。力谱作用于没有约束的节点，可以利用命令 F 或者 FK 来施加，其方向分别用 FX，FY，FZ 表示。功率谱密度谱[SVTYP，4]在内部被转化为位移响应谱并且限定为平面窄带谱，详情可以参考 ANSYS 帮助文档。

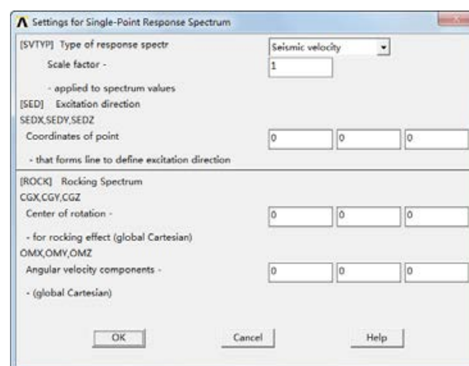


图 13-3 单点响应谱分析选项

（2）直接激励[SED]。

（3）谱值与频率的曲线[FREQ, SV]。SV 和 FREQ 命令可以用来定义谱曲线。可以定义一族谱曲线，每条曲线都有不同的阻尼率，可以利用 STAT 命令来列表显示谱曲线值。另一条命令 ROCK 可用来定义摆动谱。

（4）阻尼。如果定义超过多种阻尼，ANSYS 程序会对每种频率计算出有效的阻尼比。然后对谱曲线取对数计算出有效阻尼比处对应的谱值。如果没指定阻尼，程序会自动选择阻尼最低的谱曲线。

阻尼有如下几种有效形式：

- Beta (stiffness) Damping [BETAD]

该选项定义频率相关的阻尼比

● Constant Damping Ratio [DMPRAT]

该选项指定可用于所有频率的阻尼比常数

● Modal Damping [MDAMP]



材料相关阻尼比[MP,DAMP]也是有效，但必须在模态分析步骤指定。“MP,DAMP”命令还可以指定材料相关阻尼比常数，但不能指定用于其他分析中的材料相关刚度阻尼。

4. 开始求解

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

求解输出结果中包括参与因子表。该表作为打印输出的一部分，列出了参与因子、模态系数（基于最小阻尼比）以及每阶模态的质量分布。用振型乘以模态系数就可以得到每阶模态的最大响应（模态响应）。利用“*GET”命令可以重新得到模态系数，在“SET”命令里可以将它作为一个比例因子。

如果还有其他的响应谱，重复 2、3 步骤，注意，此时的求解不会写入“file.rst”文件。

5. 离开求解器

命令：FINISH。

GUI：Close the Solution menu。

13.2.4 扩展模态

命令：MXPAND。

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Modal[1]。

Main Menu > Solution > Analysis Type > Expansion Pass[2]。

Main Menu > Solution > Load Step Opts > Expansion Pass > Expand Modes[3]。

（1）弹出“New Analysis”对话框，选择“Modal”选项，如图 13-4 所示。

（2）弹出“Expansion Pass”对话框，选择“Expansion pass”选项，如图 13-5 所示，单击“OK”按钮。

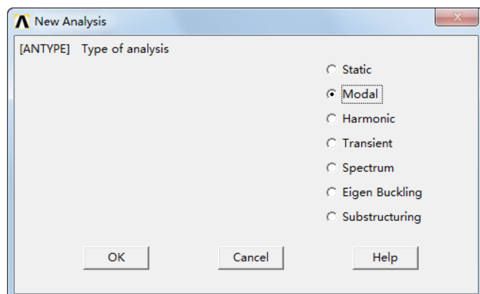


图 13-4 “New Analysis”对话框

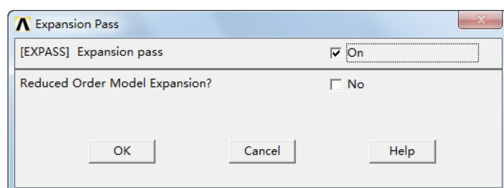


图 13-5“Expansion Pass”对话框

（3）弹出“Expand Modes”对话框，如图 13-6 所示，填入想要跨展的模态或者频率范围，如果想计算应力，选择“Elcalc”选项，单击“OK”按钮。

不论模态分析时采用何种模态提取方法（兰索斯方法、子空间方法或者减缩方法），都需要扩展模态。前面已经说过模态扩展的具体方法和步骤，但要记住以下两点：

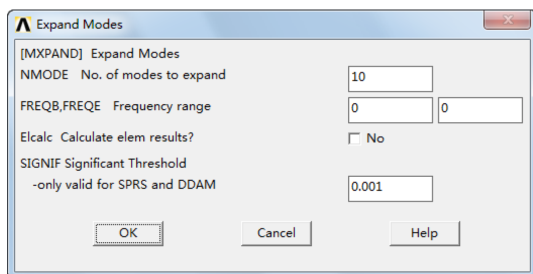


图 13-6 “Expand Modes”对话框

（1）只有有意义的模态才能被有选择的扩展。如果用命令方法，可以参考“MSPAND”命令的“SIGNIF”选项；如果用 GUI 路径，在模态分析步骤时，在“Expansion Pass”对话框（如图 13-5 所示）选择“No”，然后就可以在谱分析结束后用一个单独的步骤来扩展模态。

（2）只有扩展后的模态才能进行合并模态操作。

另外，如果想要扩展所有模态，可以在模态分析步骤时就选择扩展模态。但如果想只是有选择的扩展模态（只扩展对求解有意义的模态），则必须在谱分析结束后用单独的模态扩展步骤来完成。



只有扩展后的模态才会写入结果文件（Jobname.RST）中。

13.2.5 合并模态

模态合并作为一个单独的过程，其步骤如下：

1．进入求解器

命令：/SOLU

GUI：Main Menu > Solution

2．定义求解类型

命令：ANTYPE

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis

● 选项：New Analysis [ANTYPE]

选择 New Analysis。

● 选项：Analysis Type: Spectrum [ANTYPE]

选择 analysis type spectrum。

3．选择一种合并模态方式

ANSYS 程序提供了 5 种合并模态方式，分别是：

● Square Root of Sum of Squares (SRSS)

● Complete Quadratic Combination (CQC)

● Double Sum (DSUM)

● Grouping (GRP)

● Naval Research Laboratory Sum (NRLSUM)

其中，NRLSUM 方法专门用于动力设计分析方法，用下面的方法激活合并模态方法：

命令：SRSS, CQC, DSUM, GRP, NRLSUM。

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Spectrum。

Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Opts > Single-pt resp。

Main Menu > Load Step Opts > Spectrum > Spectrum-Single Point > Mode Combine。

弹出 Mode Combination Methods 对话框，如图 13-7 所示。

ANSYS 允许计算 3 种不同响应类型的合并模态，对应于如图 13-7 所示对话框中 LABEL 的下拉列表。

（1）位移（label = DISP）

位移响应包括：位移、应力、力等。

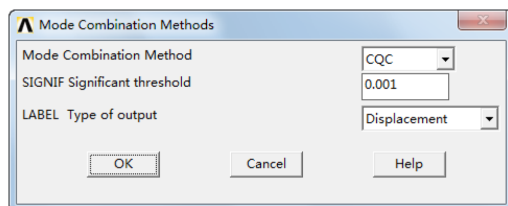


图 13-7 “Mode Combination Methods”对话框

（2）速度（label = VELO）

速度响应包括：速度、应力速度、集中力速度等。

（3）加速度（label = ACEL）

加速度响应包括：角速度、应力加速度、集中力加速度等。

在分析地震波和冲击波时，DSUM 方法还允许输入时间。



如果要选用 CQC 方法，则必须指定阻尼。另外，如果使用材料相关阻尼[MP,DAMP,...]，在模态扩展时就必须计算应力（在命令 MXPAND 中设置 Elcalc = YES）。

4. 开始求解

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

模态合并步骤建立一个 POST1 命令文件（Jobname.MCOM），在 POST1（通用后处

理）读入这个文件并利用模态扩展的结果文件（Jobname.RST）来进行模态合并。

文件（Jobname.MCOM）包含 POST1 命令，命令中包含由指定模态合并方法计算得到的整体结构响应的最大模态响应。

模态合并方法决定了结构模态响应如何被合并：

（1）如果选择位移响应类型（label = DISP），模态合并命令将会合并每一阶模态的位移和应力。

（2）如果选择速度响应类型（label = VELO），模态合并命令将会合并每一阶模态的速度和应力速度。

（3）如果选择加速度响应类型（label = ACEL），模态合并命令将会合并每一阶模态的加速度和应力加速度。

5. 离开求解器

命令：FINISH。

GUI：Close the Solution menu。



如果除了位移之外，还想计算速度和加速度，在合并位移类型之后，重复执行模态合并步骤以合并速度和加速度。需要记住，在执行了新的模态合并步骤之后，Jobname.MCOM 文件被重新写过了。

13.2.6 后处理

单点响应谱分析的结果文件以 POST1 命令形式被写入了模态合并文件“Jobname.MCOM ”。这些命令以某种指定的方式合并最大模态响应，然后计算出结构的整体响应。整体响应包括位移（或者速度或者加速度），另外，如果在模态扩展阶段作了相应设定，则还包括整体应力（或者应力速度或者应力加速度），应变（或者应变速度或者应变加速度），以及反作用力（或者反作用力速度或者反作用力加速度）。

可以通过 POST1（通用后处理器）来观察这些结果。



如果想直接合并衍生应力（S1, S2, S3, SEQV, SI），在读入 Jobname.MCOM 文件之前执行“SUMTYPE,PRIN”命令。默认命令“SUMTYPE,COMP”只能直接处理单元非平均应力以及这些应力的衍生量。

1. 读入 Jobname.MCOM 文件

命令：/INPUT。

GUI：Utility Menu > File > Read Input From。

2. 显示结果

（1）显示变形图

命令：PLDISP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

（2）显示云图

命令：PLNSOL or PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu or Element Solu。

利用命令 PLNSOL 和 PLESOL 可以绘制任何结果项的云图（等值线），例如应力（SX，SY，SZ，…），应变（EPELX，EPELY，EPELZ，…），位移（UX，UY，UZ，…）。如果执行了 SUMTYPE 命令，那么 PLNSOL 和 PLESOL 命令的显示结果将会受到 SUMTYPE 命令的具体设置（SUMTYPE,COMP 或者 SUMTYPE,PRIN）的影响。

利用 PLETAB 命令可以绘图显示单元表，利用 PLLS 可以绘图显示线单元数据。



利用“PLNSOL”命令绘制衍生数据（例如应力和应变）时，其节点处是平均值。在单元不同材料处、不同壳厚度处或者其他不连续时，这种平均导致节点处结果被“磨平”。如果想避免这种“磨平”的影响，可以在执行“PLNSOL”命令之前选择同种材料、通常壳厚度等的单元。

（3）显示矢量图

命令：PLVECT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined。

（4）列表显示结果

命令：PRNSOL（节点结果）
PRESOL（单元结果）
PRRSOL（反作用力）

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution。
Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。
Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution。

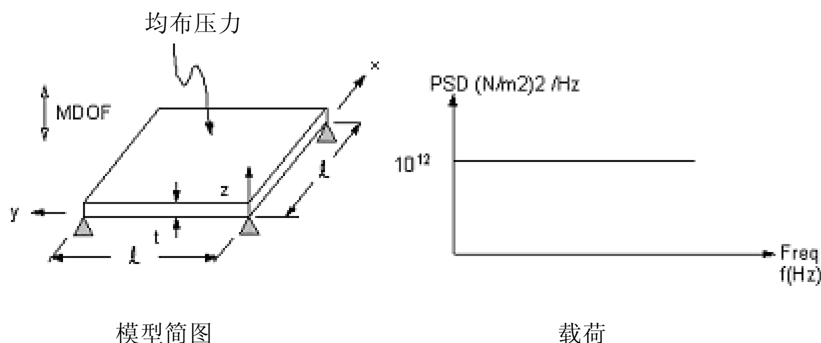
（5）其他功能：后处理器还包含许多其他功能，例如将结果映射到具体路径，将结果转化到不同坐标系，载荷工况叠加等，可以参考 ANSYS 帮助文档。

13.3 实例导航——支撑平板的动力效果分析

下面通过对一个平板结构的随机载荷分析阐述谱分析的具体方法和步骤，同时，本例采用的是直接生成有限元模型方法，该方法最大的优点在于可以完全控制节点的编号和排序，用户会通过对本例的学习更深一步体会直接方法的优越性。

13.3.1 问题描述

一块简支厚板，边长为 L，厚度为 t，单位面积的质量为 m，受到一随机均布压力作用，压力的功率谱密度为 PSD，模型和载荷如图 13-8 和表 13-3 所示，求解无阻尼固有频率处的位移峰值。



模型简图　　载荷

图 13-8 模型简图

表 13-3 材料属性、几何尺寸、加载情况

材料属性	几何尺寸	加载情况
$E = 200 \times 10^9$ N/m^2	L= 10 m	PSD = $(10^6$ N/$m^2)^2$ /Hz
$\mu = 0.3$	t = 1.0 m	Damping $\delta = 2\%$
m = 8000 kg/m^3		

13.3.2 GUI路径模式

01 前处理。

❶定义工作文件名：Utility Menu > File > Change Jobname，在弹出的“Change Jobname”对话框，在“Enter new jobname”文本框中输入“Example”，并将“New Log and error files”复选框选为“yes”，单击“OK”按钮。

❷定义工作标题：Utility Menu > File > ChangeTitle，键入文字“DYNAMIC LOAD EFFECT ON SIMPLY-SUPPORTED THICK SQUARE PLATE”，如图 13-9 所示，单击“OK”按钮。

❸定义单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”对话框，如图 13-10 所示，单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在左面滚动栏中选择“Structural”及其下的“Shell”，在右面的滚动栏中选择“8node 281”，如图 13-11 所示，单击“OK”按钮，回到图 13-10 所示的对话框。

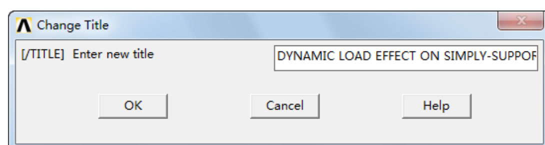


图 13-9 定义工作标题

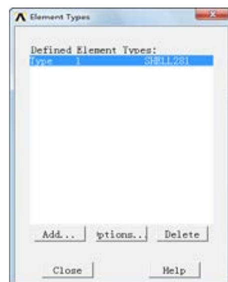


图 13-10 “Element Types”对话框

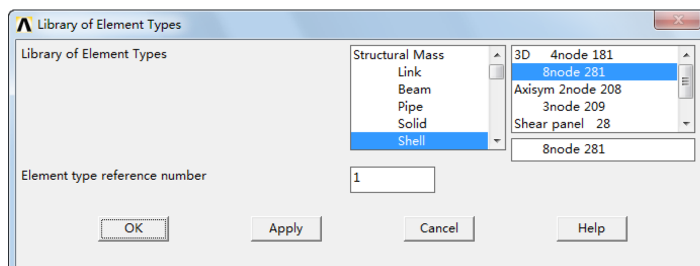


图 13-11 “Library of Element Types”对话框

❹定义材料性质：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”对话框，如图 13-12 所示。

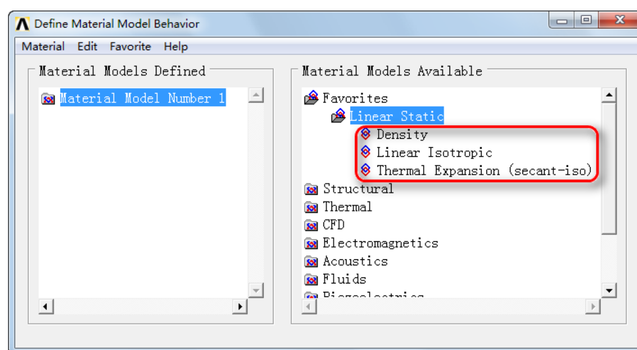


图 13-12 “Define Material Model Behavior”对话框

❺在“Material Models Available”栏目中连续单击 Favorites > Linear Static > Density，弹出“Density for Material Number 1”对话框，如图 13-13 所示，在“DENS”后键入 8000，单击“OK”按钮。

❻在“Material Models Available”栏目中连续单击 Favorites > Linear Static > Linear Isotropic，弹出“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，如图 13-14 所示，在“EX”后键入“2e+011”，在“PRXY”后键入 0.3，单击“OK”按钮。

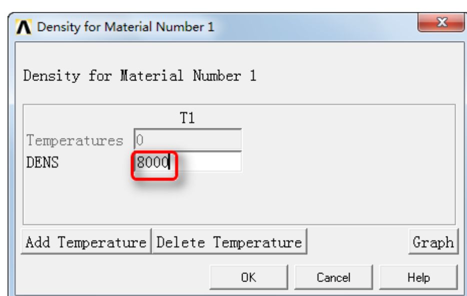


图 13-13 “Density for Material Number 1”对话框

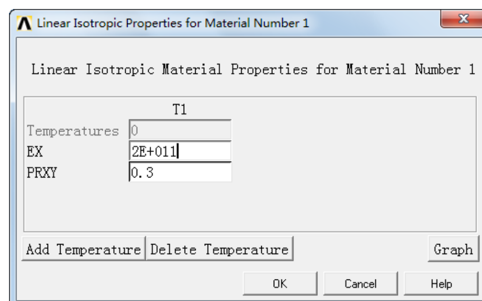


图 13-14 “Linear Isotropic Properties for Material Number 1“对话框

❼在“Material Models Available”栏目中连续单击 Favorites > Linear Static > Thermal Expansion（Secant-iso），弹出“Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1”对话框，如图 13-15 所示，在“ALPX”后键入“1E-006”，单击“OK”按钮。完成后的对话框如图 13-16 所示。选择菜单路径 Material > Exit，退出材料定义窗口。

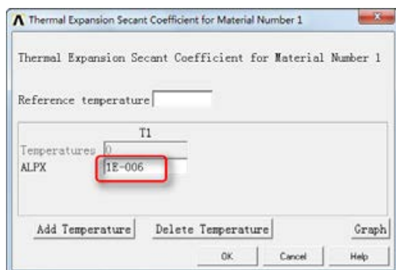


图 13-15 “Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1”对话框

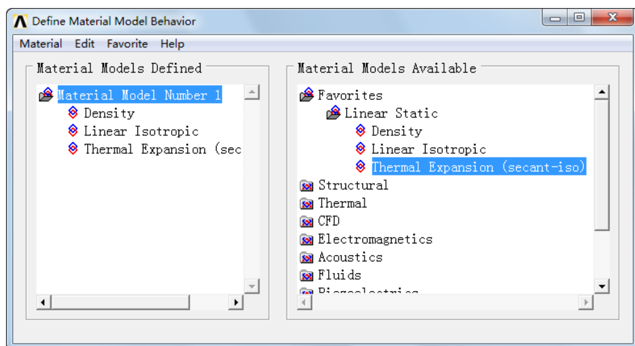


图 13-16 “Define Material Model Behavior”对话框

❽定义厚度：Main Menu > Preprocessor > Sections > Shell > Lay-up > Add / Edit，输入“Thickness” 为 1，单击“Integration Pts ”为 5，如图 13-17 所示。单击“OK”按钮。

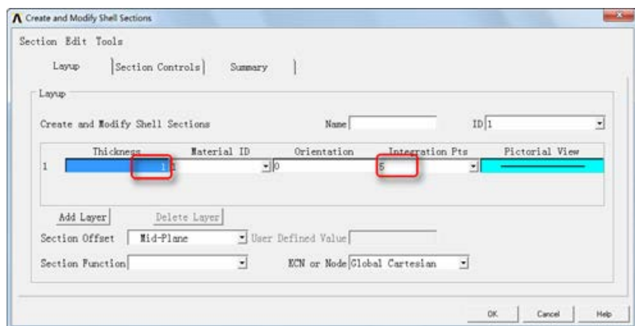


图 13-17 “Create and Modify Shell Sections”对话框

❾创建节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”后

面的输入栏中输入 1，如图 13-18 所示，在“X,Y,Z　Location in active CS”后面的输入栏中分别输入“0，0，0”，单击“Apply”按钮。

⑩在“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框中，在“NODE Node number”后面的输入栏中输入 9，在“X,Y,Z　Location in active CS”后面的输入栏中分别输入“0，10，0”，单击“OK”按钮。

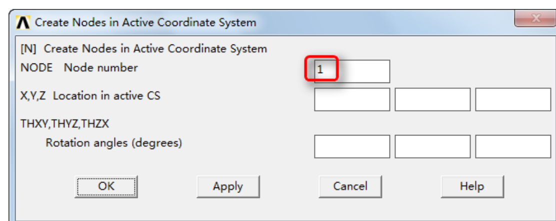


图 13-18 生成第一个节点

⑪打开节点编号显示控制：Utility Menu > PlotCtrls > Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，单击“NODE Node numbers”后面的选项使其显示为“On”，如图 13-19 所示，单击“OK”按钮。

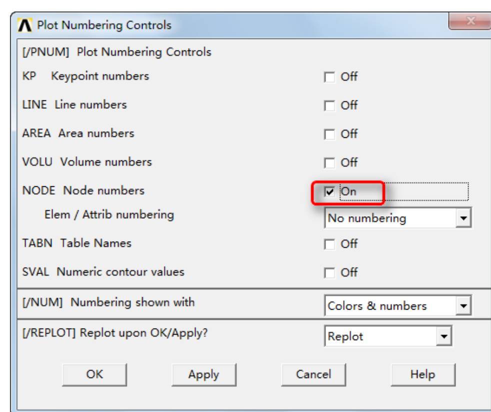


图 13-19 打开节点编号显示控制

⑫选择菜单路径：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options，弹出“Window Options”对话框，在“[/TRIAD] Location of triad”后面的下拉列表中选择“Not shown”，如图 13-20 所示，单击“OK”按钮关闭该对话框。

⑬插入新节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Fill between Nds，弹出“Fill between Nds”拾取菜单，如图 13-21 所示。用鼠标在屏幕上单击拾取编号为 1 和 9 的两个节点，单击“OK”按钮，弹出“Create Nodes Between 2 Nodes”对话框。单击“OK”按钮接受默认设置，如图 13-22 所示。

⑭复制节点组：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Nodes > Copy，弹出“Copy nodes”拾取菜单，如图 13-23 所示，单击上面的“Box”选项，然后在屏幕上框选编号为 1～9 的节点（即现在的所有节点），单击“OK”按钮。

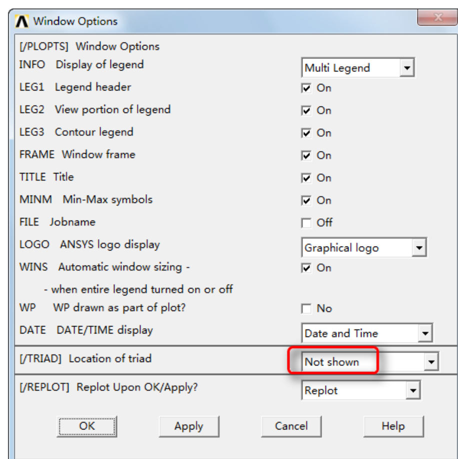


图 13-20 窗口显示控制对话框

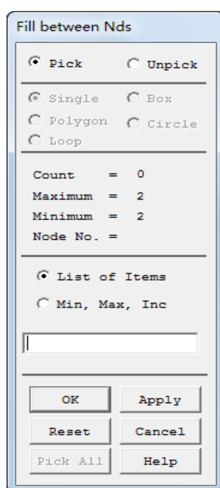


图 13-21 “Fill between Nds”拾取菜单

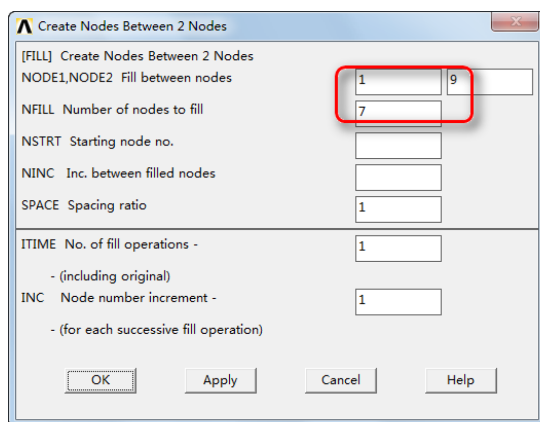


图 13-22 在两节点之间创建节点对话框

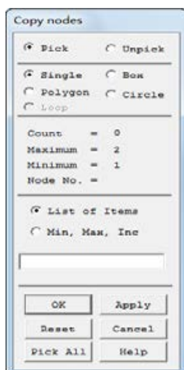


图 13-23 “Copy nodes”拾取菜单

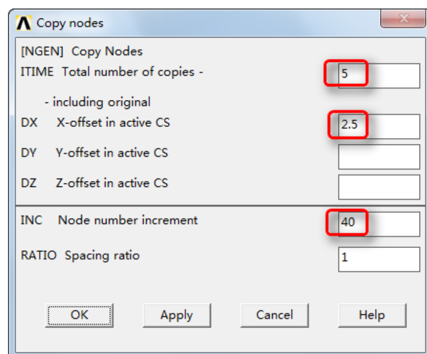


图 13-24 “Copy nodes”对话框

⑮弹出“Copy nodes”对话框，如图 13-24 所示，在“ITIME Total number of copies”后面输入 5，在“DX X-offset in active CS”后面输入 2.5，在“INC Node number increment”

后面输入 40，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 13-25 所示。

9	49	89	129	169
8	48	88	128	168
7	47	87	127	167
6	46	86	126	166
5	45	85	125	165
4	44	84	124	164
3	43	83	123	163
2	42	82	122	162
1	41	81	121	161

图 13-25 第一次复制节点后显示

⑯创建节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”后面的输入栏中输入 21，在“X,Y,Z Location in active CS”后面的输入栏中分别输入“1.25，0，0”，如图 13-26 所示，单击“Apply”按钮。

⑰在“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框中，在“NODE Node number”后面的输入栏中输入 29，在“X,Y,Z Location in active CS”后面的输入栏中分别输入“1.25，10，0”，单击“OK”按钮。

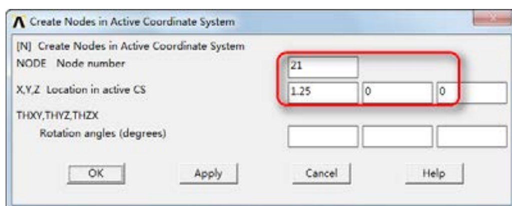


图 13-26 生成第一个节点

⑱插入新节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Fill between Nds，弹出“Fill between Nds”拾取菜单。用鼠标在屏幕上单击拾取编号为 21 和 29 的两个节点，单击“OK”按钮，弹出“Create Nodes Between 2 Nodes”对话框。在“NFILL Number of nodes to fill”后面输入 3，单击“OK”按钮接受其余默认设置，如图 13-27 所示。

⑲复制节点组：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Nodes > Copy，弹出“Copy nodes”拾取菜单，单击上面的“Box”选项，然后在屏幕上框选编号为 21～29 的节点，单击“OK”按钮。弹出“Copy nodes”对话框，如图 13-28 所示，在“ITIME Total number of copies”后面输入 4，在“DX X-offset in active CS”后面输入 2.5，在“INC Node number increment”后面输入 40，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 13-29 所示。

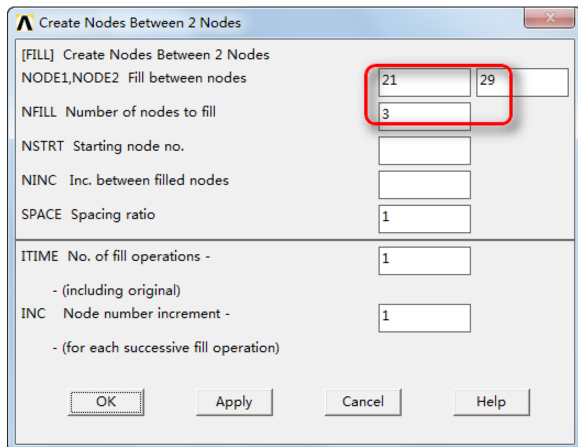


图 13-27 在两节点之间创建节点对话框

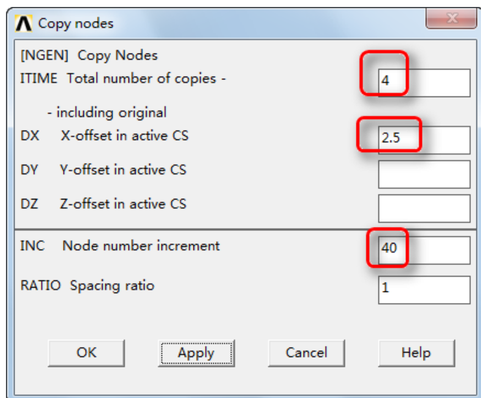


图 13-28 “Copy nodes”对话框

9	29	49	69	89	109	129	149	169
8		48		88		128		168
7	27	47	67	87	107	127	147	167
6		46		86		126		166
5	25	45	65	85	105	125	145	165
4		44		84		124		164
3	23	43	63	83	103	123	143	163
2		42		82		122		162
1	21	41	61	81	101	121	141	161

图 13-29 第二次复制节点后显示

⑳创建单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > User Numbered > Thru Nodes，弹出“Create Elems User-Num”对话框，如图 13-30 所示，单击“OK”按钮接受默认选项。弹出“Elements from Nodes”拾取菜单，用鼠标在屏幕上依次拾取编号为“1,41,43,3,21,42,23,2”的节点，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 13-31 所示。

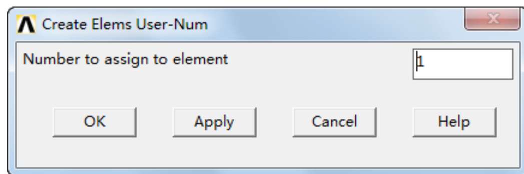


图 13-30 “Create Elems User-Num”对话框



创建单元时一定要注意选择节点的顺序，先依次选择 4 个边节点，然后依

次选择 4 个中节点。

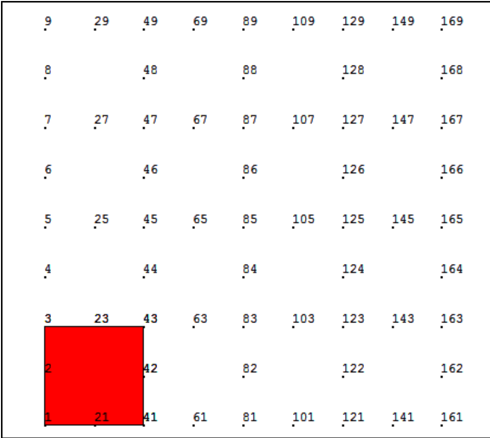


图 13-31 创建第一个单元

㉑复制单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered，弹出“Copy Element Auto-num”拾取菜单，用鼠标在屏幕上单击拾取刚创建的单元，单击“OK”按钮，弹出“Copy Elements（Automatically-Numbered）”对话框，如图 13-32 所示，在“ITIME Total number of copies”后面输入 4，在“NINC Node number increment”后面输入 2，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 13-33 所示。

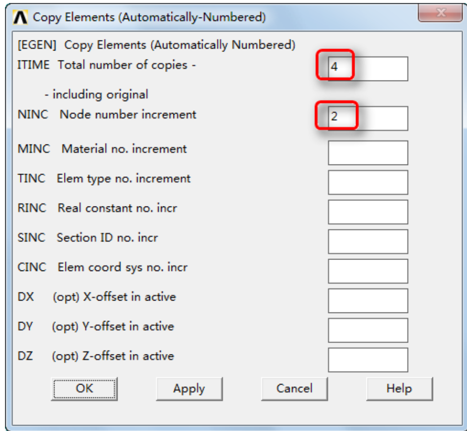


图 13-32 “Copy Elements（Automatically-Numbered）”对话框

㉒复制单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Elements > Auto Numbered，弹出“Copy Element Auto-num”拾取菜单，用鼠标在屏幕上单击拾取屏幕上的所有单元（共 4 个），单击“OK”按钮，弹出“Copy Elements（Automatically-Numbered）”对话框，在“ITIME Total number of copies”后面输入 4，在“NINC Node number increment”后面输入 40，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 13-34 所示。

02 模态分析。

❶设定分析类型：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，如图 13-35 所示，在“[ANTYPE] Type of analysis”后面单击“Modal”项，单击“OK”按钮。

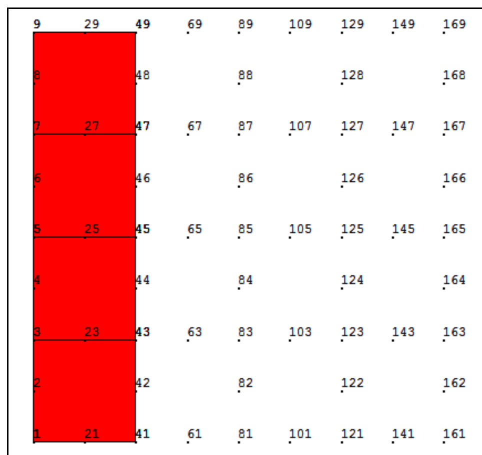


图 13-33　第一次单元复制后显示

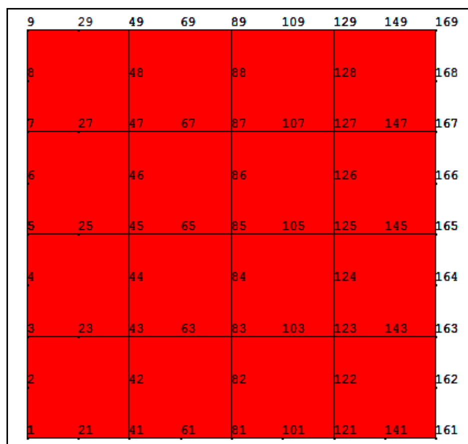


图 13-34　第二次复制单元显示

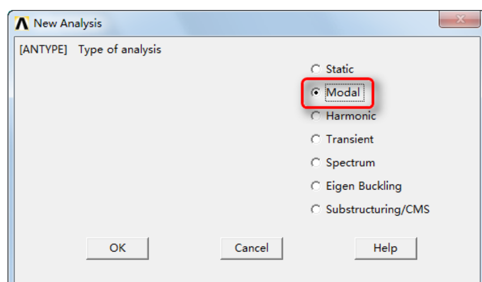


图 13-35　设置分析类型

❷设定分析选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出如图 13-36 所示的“Modal Analysis”对话框，在“[MODOPT] Mode extraction method”后面单击“Reduced”项，在“[MXPAND] Expand mode shapes”后面单击“Yes”项，在“NMODE No. of modes to expand”后面输入 16，单击“OK”按钮接受其余默认设置。

❸弹出“Reduced Modal Analysis”对话框，如图 13-37 所示，单击“OK”按钮接受默认设置。



如果在“Analysis Type”下没有找到 “Analysis Options”菜单，可以单击菜单路径：Main Menu > Solution > Unabridged menu。

❹施加载荷：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Elements，弹出“Apply PRES on elems”拾取菜单。单击“Pick All”按钮，弹出“Apply PRES on elems”对话框，如图 13-38 所示。在“VALUE Load PRES value”后面输入“-1E6”，单击“OK”按钮接受其余默认设置。

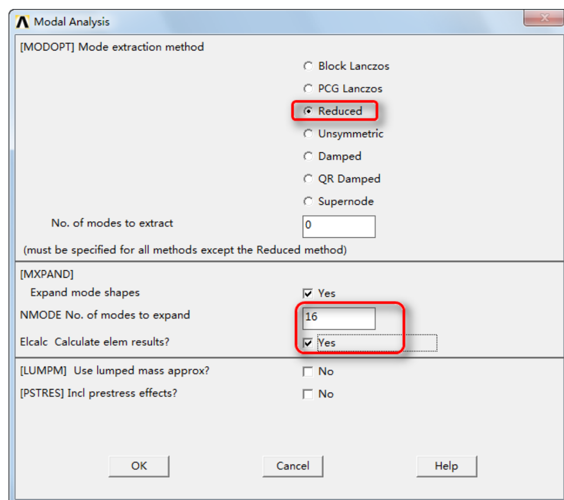


图 13-36 “Modal Analysis”对话框

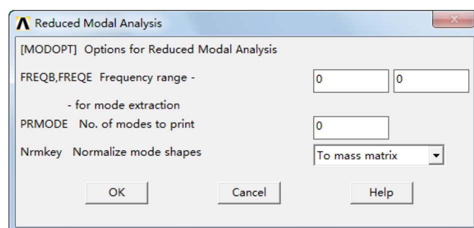


图 13-37 “Reduced Modal Analysis”对话框

❺定义面内约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单。单击“Pick All”按钮，弹出如图 13-39 所示的“Apply U,ROT on Nodes”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”后面的列表中单击“UX、UY、ROTZ”几个选项，单击“OK”按钮。

❻定义面内约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单。单击“Pick All”按钮，弹出如图 13-39 所示的对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”后面的列表中单击“UX、UY、ROTZ”几个选项，单击“OK”按钮。

❼定义左右边界条件：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单。用鼠标在屏幕上单击拾取左边和右边的节点（左边节点编号为 1，2，3，4，5，6，7，8，9；右边节点编

号为 161，162，163，164，165，166，167，168，169），单击“OK”按钮，弹出如图 13-40 所示的“Apply U,ROT on Nodes”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”后面的列表中单击“UZ、ROTX”两个选项，单击“OK”按钮。

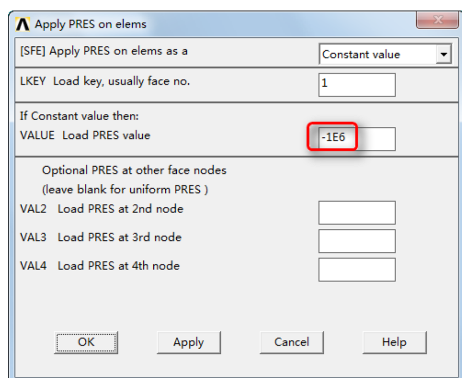


图 13-38 施加面载荷

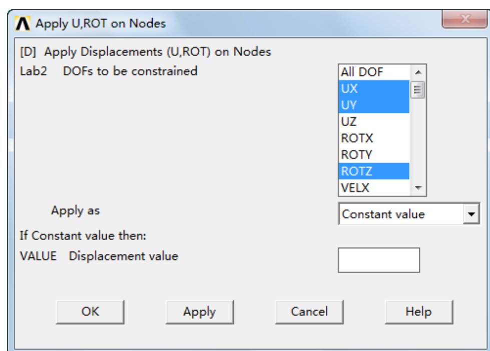


图 13-39 施加面内约束

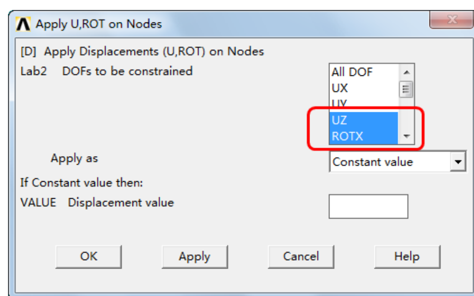


图 13-40 定义左右边界条件

❽定义上下边界条件：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单。用鼠标在屏幕上单击拾取上边界和下边界的节点（上边界节点编号为：9，29，49，69，89，109，129，149，169；下边界节点编号为：1，21，41，61，81，101，121，141，161），单击“OK”按钮，弹出如图 13-41 所示的“Apply U,ROT on Nodes”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”后面的列表中单击“UZ、ROTY”两个选项，单击“OK”按钮。

❾选择主节点（左右界限）：Utility Menu > Select > Entities，弹出“Select Entities”工具条，如图 13-42 所示，在第一个下拉列表中选择“Nodes”，在第二个下拉列表中选择“By Location”，在下面单击“X coordinates”，在“Min，Max”后面输入 0.1，9.9，在下面选择“From Full”，单击“OK”按钮。

❿选择主节点（上下界限）：Utility Menu > Select > Entities，弹出“Select Entities”工具条，如图 13-43 所示，在第一个下拉列表中选择“Nodes”，在第二个下拉列表中选择“By Location”，在下面单击“Y coordinates”，在“Min，Max”后面输入“0.1，9.9”，在下面选择“Reselect”，单击“OK”按钮。

⑪显示刚才选择的节点：Utility Menu > Plot > Nodes，屏幕显示如图 13-44 所示。

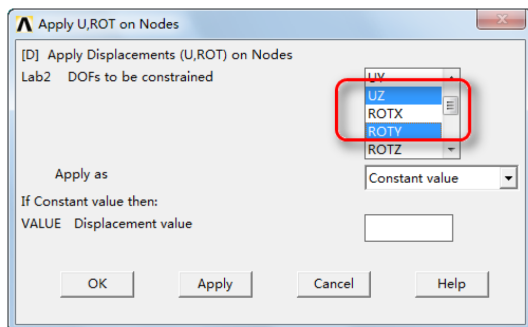


图 13-41 定义上下边界条件

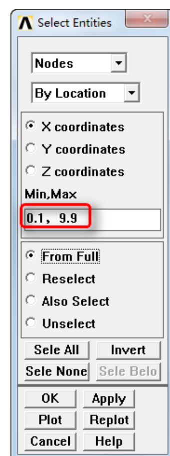


图 13-42 选择左右界限

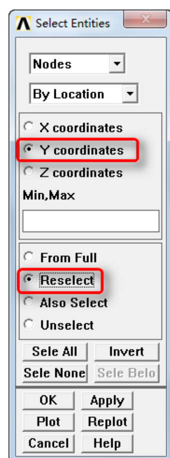


图 13-43 选择上下界限

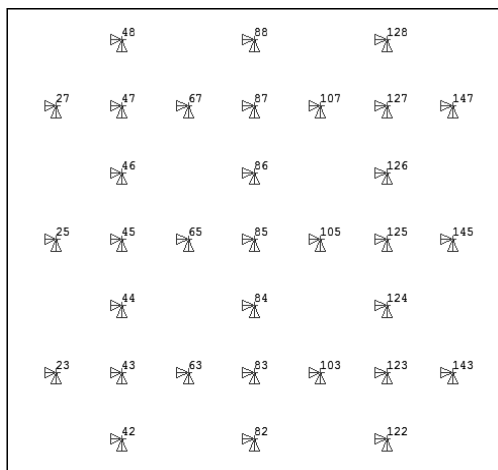


图 13-44 选择的节点

⑫定义主自由度：Main Menu > Solution > Master DOFs > User Selected > Define，弹出“Define Master DOFs”拾取菜单，单击“Pick All”按钮，弹出“Define Master DOFs”对话框，如图 13-45 所示，在“Lab1 1st degree of freedom”后面的下拉列表中选择“UZ”，单击“OK”按钮。

⑬选择所有节点：Utility Menu > Select > Everything，然后执行 Utility Menu > Plot > Replot 路径，此时的屏幕显示如图 13-46 所示。

⑭模态分析求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示窗口和“Solve Current Load Step”对话框，仔细浏览信息提示窗口中的信息，如果无误则单击 File > Close 将其关闭。单击“OK”按钮开始求解。当静力求解结束时，屏幕上会弹出“Solution is done”提示框，单击“Close”按钮关闭它。

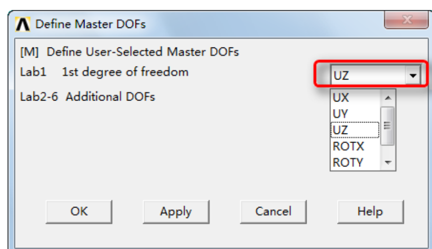


图 13-45 定义主自由度

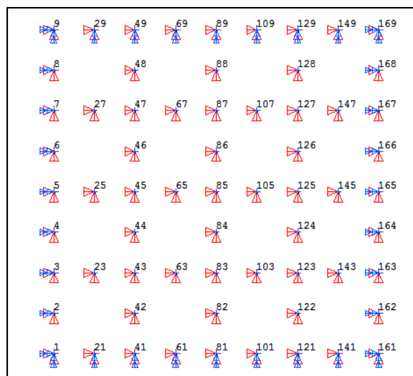


图 13-46 施加载荷约束之后的节点模型

⓯定义比例参数：Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data，弹出 Get Scalar Data 对话框，在“Type of data to be retrieved”后面第一个列表中单击“Result data”，在第二个列表中单击“Modal results”，如图 13-47 所示，单击“OK”按钮。

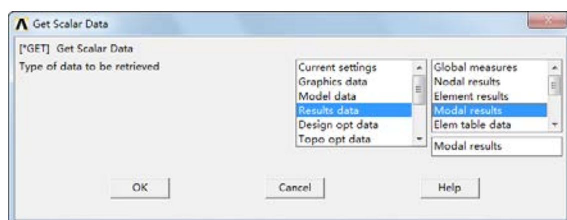


图 13-47 “Get Scalar Data”对话框

⓰弹出另外一个“Get Modal Results”对话框，如图 13-48 所示，在“Name of parameter to be defined”后面输入“F”，在“Mode number N”后面输入 1，在“Modal data to retrieved”后面的列表中选择“Frequency FREQ”，单击“OK”按钮。

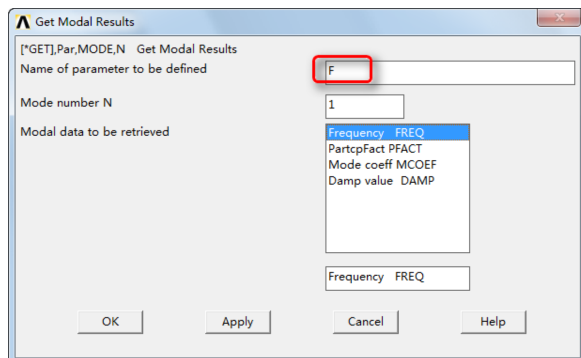


图 13-48 “Get Model Results”对话框

⓱查看比例参数：Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters，弹出“Scalar Parameters”对话框，如图 13-49 所示。

⓲退出求解器：Main Menu > Finish。

03 谱分析。

❶定义谱分析：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis，弹出如图13-50 所示的“New Analysis”对话框，在“Type of analysis”后面单击“Spectrum”，单击“OK”按钮。

❷设定谱分析选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出“Spectrum Analysis”对话框，如图 13-51 所示，在“Sptype Type of spectrum”后面选择 P.S.D，在“NMODE No. of modes for solu”后面输入 2，在“Elcalc Calculate elem stresses”后面单击“Yes”，单击“OK”按钮。

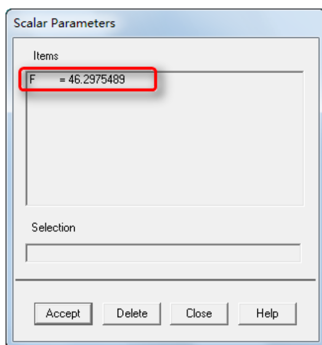


图 13-49 Scalar Parameters

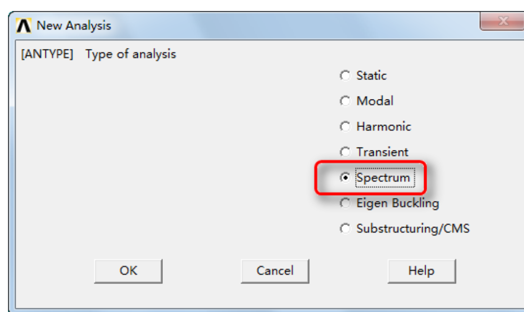


图 13-50 定义新的分析类型（谱分析）

❸设置 PSD 分析：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > PSD > Settings，弹出“Settings for PSD Analysis”对话框，在“[PSDUNIT] Type of response spct”后面的下拉列表中选择“Pressure spct”，在“Table number”后面输入 1，如图 13-52 所示，单击“OK”按钮。

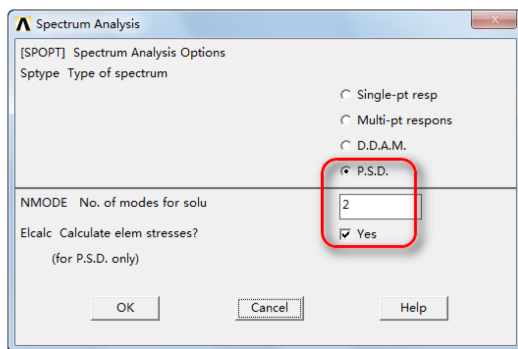


图 13-51 定义谱分析选项

❹定义阻尼：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping，弹出“Damping Specifications”对话框，如图 13-53 所示，在“[DMPRAT] Constant damping ratio”后面输入 0.02，单击“OK”按钮。

❺Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > PSD > PSD vs Freq，弹出

“Table for PSD vs Frequency”对话框，如图 13-54 所示，在“Table number to be defined”后面输入 1，单击“OK”按钮。

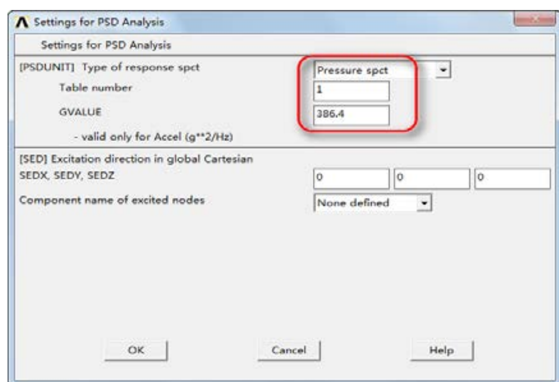


图 13-52 “Settings for PSD Analysis”对话框

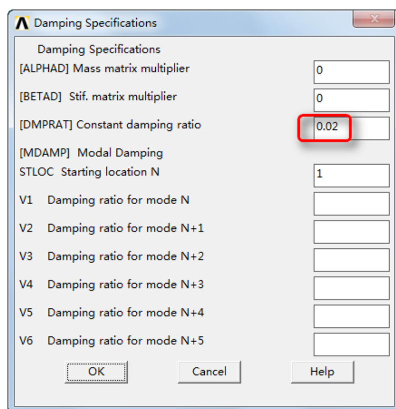


图 13-53 “Damping Specifications”对话框

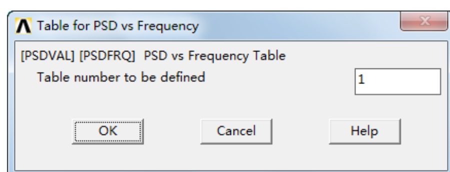


图 13-54 “Table for PSD vs Frequency”对话框

❻弹出“PSD vs Frequency Table”对话框，如图 13-55 所示，在“FREQ1,PSD1”后面依次输入“1，1”，在“FREQ2,PSD2”后面依次输入“80，1”，单击“OK”按钮。

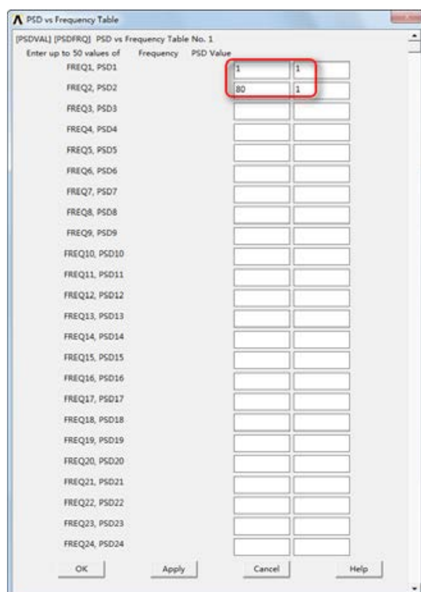


图 13-55 “PSD vs Frequency Table”对话框

❼设定载荷比例因子：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Load Vector > For PSD，弹出“Apply Load Vector for Power Spectral Density”对话框，如图 13-56 所示，在“FACT Scale factor”后面输入 1，单击“OK”按钮。弹出警告提示框，如图 13-57 所示，单击“Close”按钮。

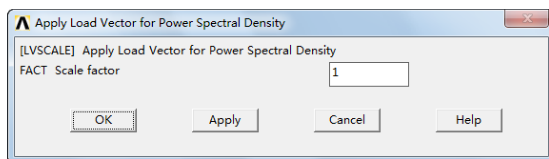


图 13-56 “Apply Load Vector for Power Spectral Density”对话框

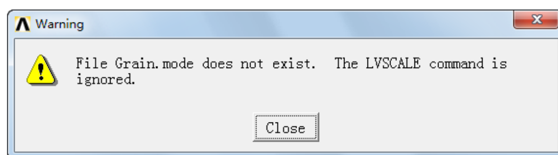


图 13-57 警告提示框

❽计算参与因子：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > PSD > Calculate PF，弹出“Calculate Participation Factors”对话框，如图 13-58 所示，在“TBLNO Table no. of PSD table”后面输入 1，在“Excit Base or nodal excitation”后面的下拉列表中选择“Nodal excitation”，单击“OK”按钮。弹出“Solution is done”对话框，如图 13-59 所示，单击“Close”按钮关闭它。

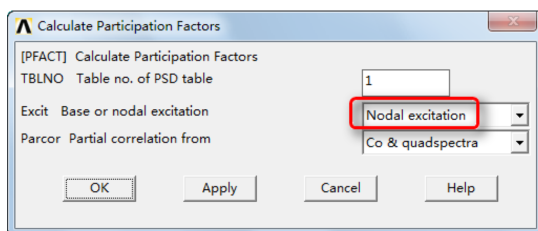


图 13-58 “Calculate Participation Factors”对话框

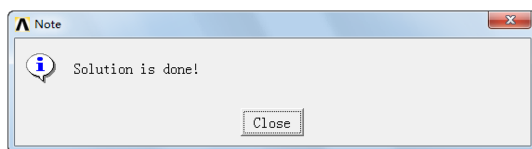


图 13-59 参与因子计算完毕

❾设置结果输出：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > PSD > Calc Controls，弹出“PSD Calculation Controls”对话框，如图 13-60 所示，在“Displacement solution（DISP）”后面的下拉列表中选择“Relative to base”，单击“OK”按钮接受其

余默认选项。

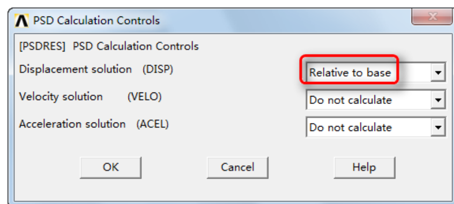


图 13-60 “PSD Calculation Controls”对话框

❿设置合并模态：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum > PSD > Mode Combine，弹出“PSD Combination Method”对话框，如图 13-61 所示，单击“OK”按钮接受默认设置。

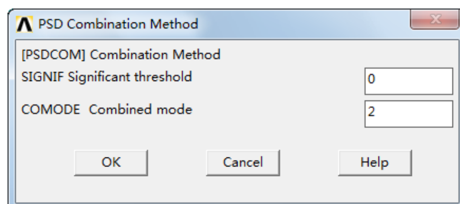


图 13-61 “PSD Combination Method”对话框

⓫谱分析求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示窗口和“Solve Current Load Step”对话框。仔细浏览信息提示窗口中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“OK”按钮开始求解。当求解结束时，屏幕上会弹出“Solution is done”提示框，单击 Close 关闭它。

⓬退出求解器：Main Menu > Finish。

04 POST1 后处理。

❶读入子步结果：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick，弹出“Result File”对话框，如图 13-62 所示，单击“Set”为 17 的项，单击“Read”按钮，单击“Close”按钮。

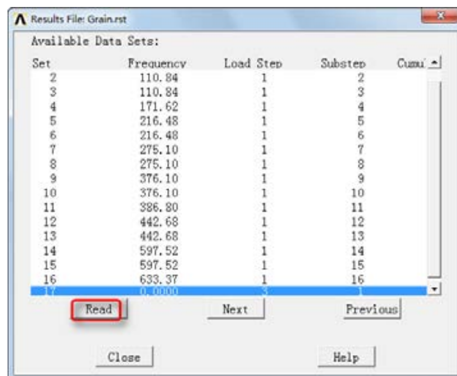


图 13-62 “Result File”对话框

❷设置视角系数：Utility Menu > PlotCtrls > View Settings > Viewing Direction，弹出“Viewing Direction”对话框，如图 13-63 所示，在“WN Window number”后面的下拉列表中选择“Window 1”，在“[/VIEW] View direction”后面依次输入“2、3、4”，单击“OK”按钮。

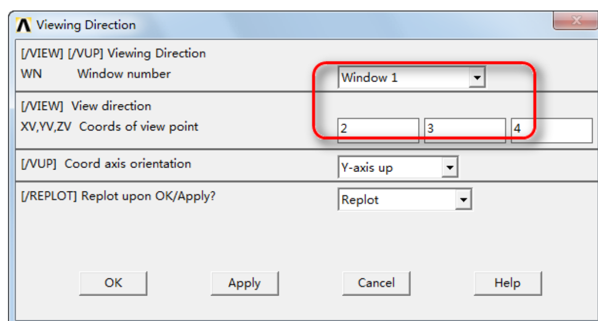


图 13-63 “Viewing Direction”对话框

❸绘图显示：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，如图 13-64 所示，在“Nodal Solution”中选择“DOF Solution”，然后选择“Z-Component of displacement”，单击“OK”按钮接受其余默认设置，屏幕显示如图 13-65 所示。

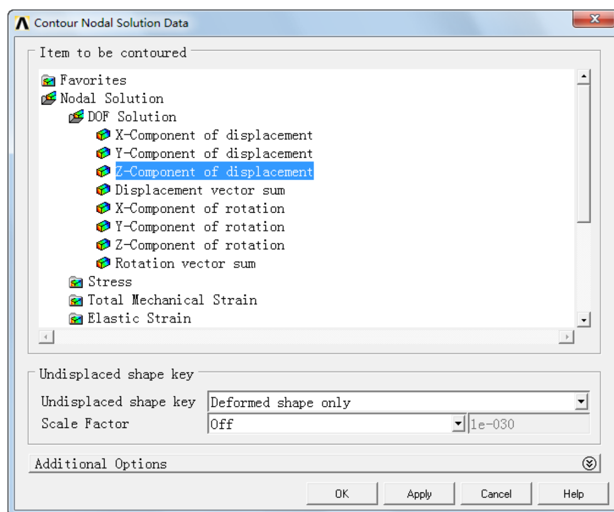


图 13-64 “Contour Nodal Solution Data”对话框

❹列表显示：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution，弹出“List Nodal Solution”对话框，如图 13-66 所示，在“Nodal Solution”中选择“DOF solution”，然后选择“Z-Component of displacement”，单击“OK”按钮，屏幕会弹出列表显示框。

❺退出后处理器：Main Menu > Finish。

05 谐响应分析。

❶定义求解类型：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis。“New

Analysis”对话框出现，选择“Harmonic”，如图 13-67 所示，单击“OK”按钮。

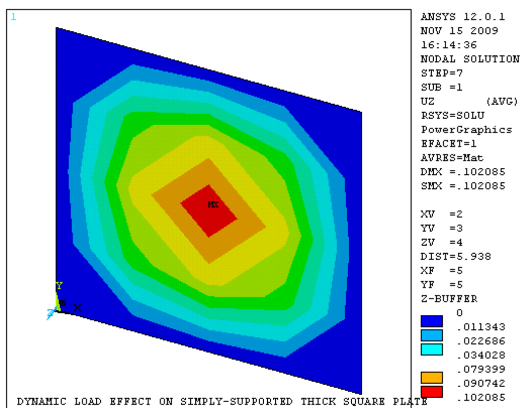
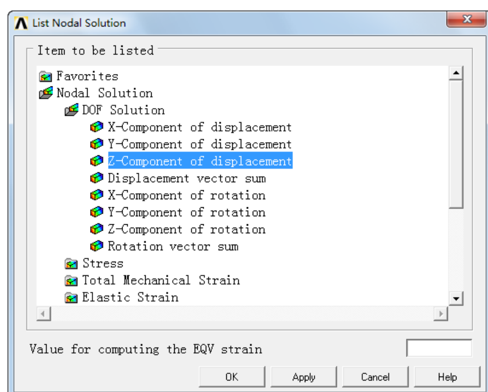


图 13-65 Z 向位移云图显示



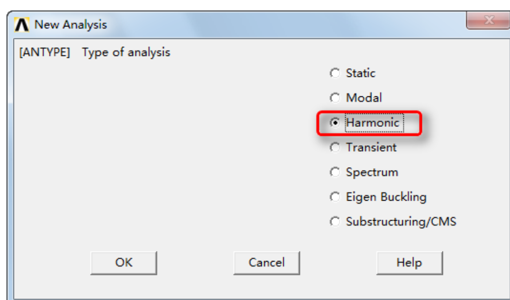


图 13-66 “List Nodal Solution”对话框　　图 13-67 定义分析类型为谐响应分析

❷设置求解选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出“Harmonic Analysis”对话框，在“[HROPT] Solution method”后面的列表中选择“Mode Superpos'n”，在“[HROUT] DOF printout format”后面的下拉列表中选择“Amplitud+ phase”，如图 13-68 所示，单击“OK”按钮。

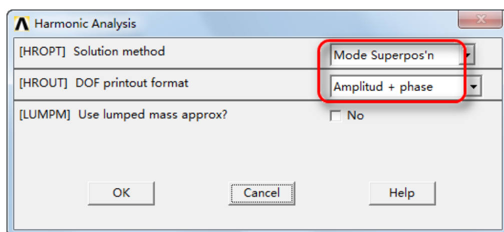


图 13-68 “Harmonic Analysis”对话框

❸弹出“Mode Sup Harmonic Analysis”对话框，如图 13-69 所示，单击“OK”按钮

接受默认设置。

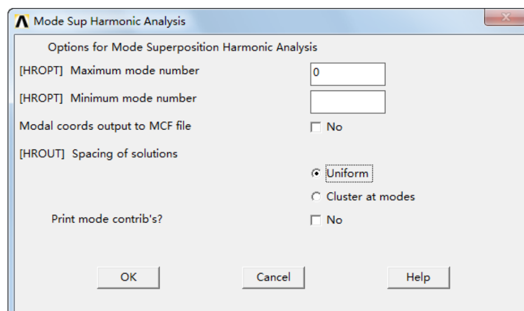


图 13-69 “Mode Sup Harmonic Analysis”对话框

❹设置载荷：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps，弹出“Harmonic Frequency and Substep Options”对话框，在“[HARFRQ] Harmonic freq range”后面依次输入 1 和 80，在“[NSUBST] Number of substep”后面输入 10，在“[KBC] Stepped or ramped b.c.” 后面单击“Stepped”，如图 13-70 所示，单击“OK”按钮。

❺设置阻尼：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping，弹出“Damping Specifications”对话框，在“[DMPRAT] Constant damping ratio”后面输入 0.02，如图 13-71 所示，单击“OK”按钮。

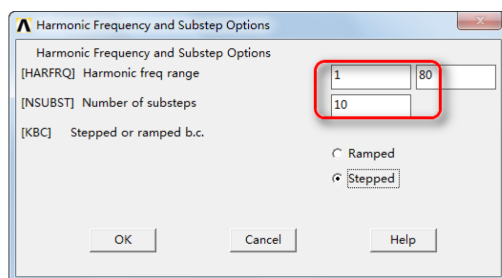


图 13-70 “Harmonic Frequency and Substep Options”对话框

❻谐响应分析求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示栏和“Solve Current Load Step”对话框。浏览信息提示栏中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“Solve Current Load Step”对话框的“OK”按钮按钮，开始求解。

❼退出求解器：Main Menu > Finish。

06 POST26 后处理。

❶进入时间历程后处理：Main Menu > TimeHist PostPro，弹出如图 13-72 所示的“Spectrum Usage”对话框，单击“OK”按钮接受默认设置，弹出如图 13-73 所示的“Time History Variables ”对话框，里面已有默认变量时间（TIME）。

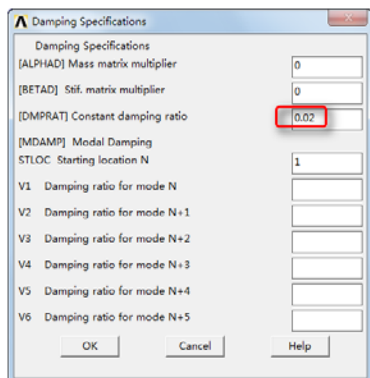


图 13-71 “Damping Specifications”对话框

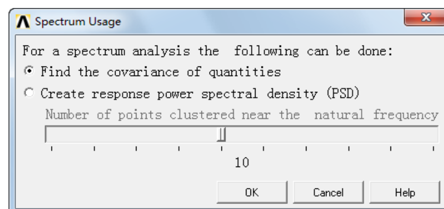


图 13-72 “Spectrum Usage”对话框

❷读入结果：单击 Time History Variables 对话框 File > Open Results，弹出读取结果对话框，如图 13-74 所示，在相应的路径下选择“spectrum.rfrq”文件，单击“打开”按钮，接着弹出如图 13-75 所示的对话框，选择模型数据文件“example13-3.db”。弹出如图 13-72 所示的对话框，单击“OK”按钮接受默认设置。回到“Time History Variables ”对话框，注意看到，此时的默认变量已经由“TIME”变为“FREQ”。

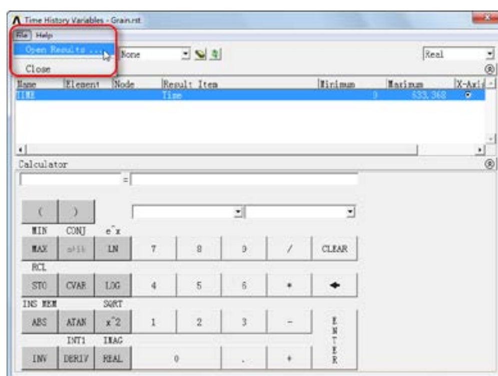


图 13-73 “Time History Variables”对话框(1)

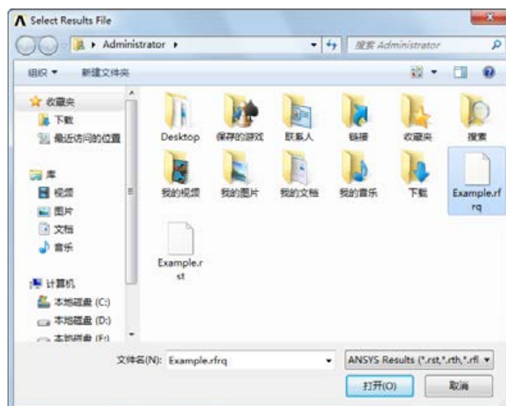


图 13-74 读取结果

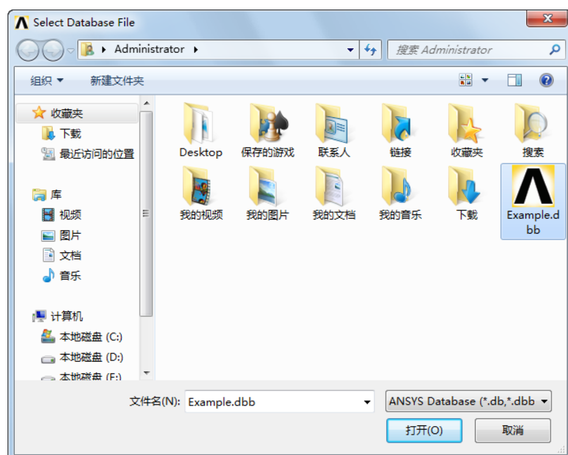


图 13-75 读取模型数据文件



在读取结果时，“响应的路径”是指工作文件存放的地址，读取的文件后缀名是 rfrq，文件名是工作名（Jobname）。

❸定义位移变量 UZ：在“Time History Variables”对话框中单击左上角的按钮，弹出“Add Time-History Variables”对话框，连续单击 Nodal Solution > DOF Solution > Z-Component of displacement，如图 13-76 所示，在“Variable Name”后面输入“UZ_2”，单击“OK”按钮。

❹弹出“Node for Data”拾取菜单，如图 13-77 所示，在拾取菜单的空白处输入 85，单击“OK”按钮。返回到“Time History Variables”对话框，不过此时变量列表里面多了一项“UZ_2”变量，如图 13-78 所示。

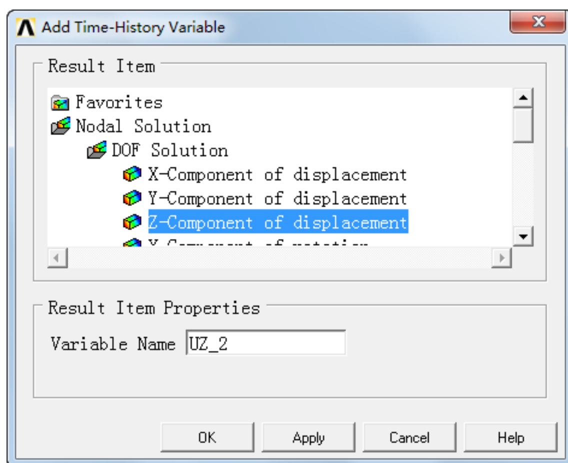


图 13-76 Add Time-History Variables 对话框

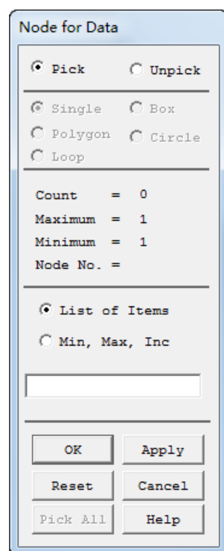


图 13-77 Node for Data 拾取菜单

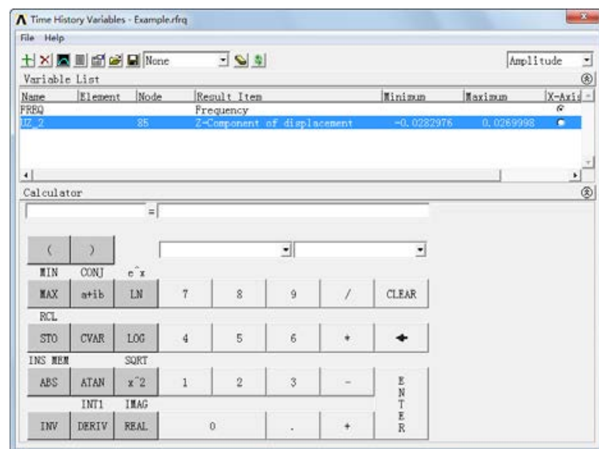


图 13-78 “Time History Variables” 对话框(2)

❺绘制位移频率曲线：在“Time History Variables” 对话框中单击第三个按钮“”，屏幕显示如图 13-79 所示。

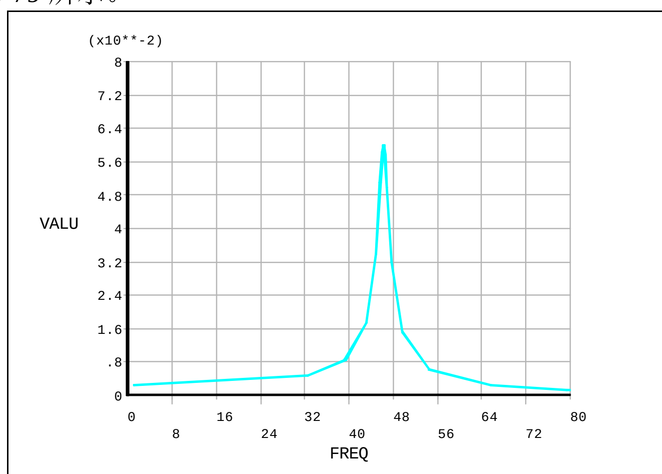


图 13-79 位移频率关系图

13.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 14 章

谐响应分析

谐响应分析用于确定线性结构在承受随时间按正弦（简谐）规律变化载荷时的稳态响应的技术。本章介绍了 ANSYS 谐响应分析的全流程步骤，详细讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过吉他琴弦谐响应实例对 ANSYS 谐响应分析功能进行了具体演示。

通过本章的学习，可以完整深入地掌握 ANSYS 谐响应分析的各种功能和应用方法。

学 习 要 点

- 谐响应分析概论
- 谐响应分析的基本步骤
- 弹簧质子系统的谐响应分析

14.1 谐响应分析概论

谐响应分析是确定一个结构在已知频率的正弦（简谐）载荷作用下结构响应的技术。其输入为已知大小和频率的谐波载荷（力、压力和强迫位移）；或同一频率的多种载荷，可以是相同或不相同的。其输出为每一个自由度上的谐位移，通常和施加的载荷不相同；或其他多种导出量，例如应力和应变等。

谐响应分析用于设计的多个方面，例如：旋转设备（如压缩机、发动机、泵、涡轮机械等）的支座、固定装置和部件；受涡流（流体的漩涡运动）影响的结构，例如涡轮叶片、飞机机翼、桥和塔等。

任何持续的周期载荷将在结构系统中产生持续的周期响应（谐响应）。谐响应分析使设计人员能预测结构的持续动力特性，从而使设计人员能够验证其设计能否成功地克服共振，疲劳及其他受迫振动引起的有害效果。

谐响应分析的目的是计算出结构在几种频率下的响应，并得到一些响应值（通常是位移）对频率的曲线。从这些曲线上可以找到“峰值”响应，并进一步观察峰值频率对应的应力。

这种分析技术只计算结构的稳态受迫振动，发生在激励开始时的瞬态振动不在谐响应分析中考虑，如图 14-1 所示。

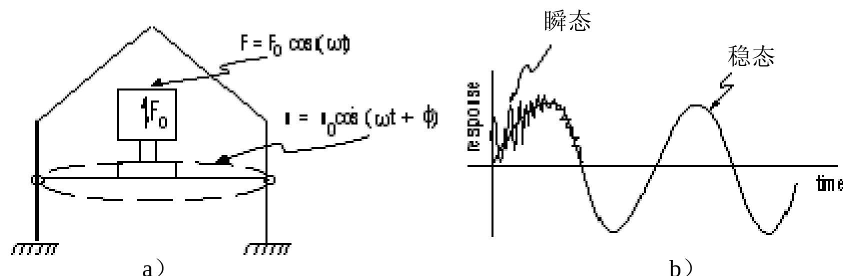


图 14-1 谐响应分析示例



图 14-1a表示标准谐响应分析系统，F_0和ω已知，I_0和Φ未知；图 14-2b表示结构的稳态和瞬态谐响应分析。

谐响应分析是一种线性分析。任何非线性特性，如塑性和接触（间隙）单元，即使被定义了也将被忽略。但在分析中可以包含非对称矩阵，如分析在流体－结构相互作用中的问题。谐响应分析同样也可以用以分析有预应力的结构，如小提琴的弦（假定简谐应力比预加的拉伸应力小得多）。

谐响应分析可以采用 3 种方法：“Full”（完全法），“Reduced”（减缩法），“Mode Superposition”（模态叠加法）。当然，还有另外一种方法，就是将简谐载荷指定为有时间历程的载荷函数而进行瞬态动力学分析，这是一种相对开销较大的方法。各种方法的

优缺点见 12.1 节。

3 种方法的共同局限性：

- 所有载荷必须随时间按正弦规律变化。
- 所有载荷必须有相同的频率。
- 不允许有非线性特性。
- 不计算瞬态效应。

可以通过进行瞬态动力学分析来克服这些限制，这是应将简谐载荷表示为有时间历程的载荷函数。

14.2 谐响应分析的基本步骤

描述如何用“Full”法来进行谐响应分析，然后会列出用“Reduced”法和“Mode Superposition”法时有差别的步骤。

“Full”法谐响应分析的过程由 3 个主要步骤组成：

（1）建模。

（2）加载并求解。

（3）观察结果以及后处理。

14.2.1 建立模型（前处理）

在这一步中需指定文件名和分析标题，然后用“PREP7”来定义单元类型，单元实常数，材料特性及几何模型。需记住的要点：

（1）在谐响应分析中，只有线性行为是有效的。如果有非线性单元，他们将被按线性单元处理。例如如果分析中包含接触单元，则它们的刚度取初始状态值并在计算过程中不再发生变化。

（2）必须指定弹性模量“EX”（或某种形式的刚度）和密度“DENS”（或某种形式的质量）。材料特性可以是线性的，各向同性的或各向异性的，恒定的或和温度相关的。非线性材料特性将被忽略。

14.2.2 加载和求解

在这一步中，要定义分析类型和选项，加载，指定载荷步选项，并开始有限元求解。下面会列出详细说明。



峰值响应分析发生在力的频率和结构的固有频率相等时。在得到谐响应分析解之前，应该首先做一下模态分析，以确定结构的固有频率。

1．进入求解器

命令：/SOLU

GUI：Main Menu > Solution。

2．定义分析类型和载荷选项

ANSYS 提供用于谐响应分析类型和求解选项见表 14-1。

表 14-1 分析类型和求解选项

选项	命令	GUI 路径
新的分析	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis
分析类型：谐响应分析	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Harmonic
求解方法	HROPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
输出格式	HROUT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
质量矩阵	LUMPM	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
方程求解器	EQSLV	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
模态数	HROPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
输出选项	HROUT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
预应力	PSTRES	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

下面对表中各项进行详细的解释。

（1）New Analysis [ANTYPE]：选“New Analysis”（新的分析）。在谐响应分析中 Restart 不可用；如果需要施加另外的简谐载荷，可以另进行一次新分析。

（2）Analysis Type: Harmonic Response [ANTYPE]：选分析类型为“Harmonic Response”（谐响应分析）

图 14-2 表示谐响应分析选项菜单。

（3）[HROPT]Solution method：选择下列求解方法中的一种：Full 法、Reduced 法、Mode Superposition 法

（4）Solution Listing Format [HROUT]：此选项确定在输出文件 Jobname.Out 中谐响应分析的位移解如何列出。可以选的方式有“real and imaginary”（实部和虚部）（默认）形式，“amplitudes and phase angles”（幅值和相位角）形式。

（5）Mass Matrix Formulation [LUMPM]：此选项用于指定是采用默认的质量阵形成方式（取决于单元类型）还是用集中质量阵近似。

注意 建议在大多数应用中采用默认形成方式。但对有些包含“薄膜”结构的问题，如细长梁或者非常薄的壳，采用集中质量矩阵近似经常产生较好的结果。另外，采用集中质量阵求解时间短，需要内存少。

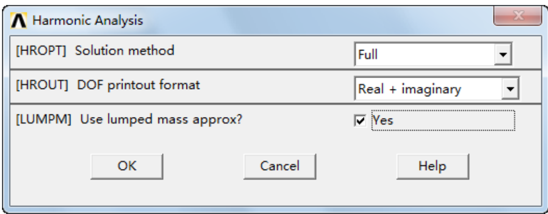


图 14-2 谐响应分析选项

设置完“Harmonic Analysis”对话框后单击“OK”按钮，则会根据设置的[HROPT] Solution Method（求解方法）弹出相应的菜单，如果“Solution Method”设置为“Full”（完全法），那么会弹出“Full Harmonic Analysis”的对话框，如图 14-3 所示，此对话框用于选择方程求解器和预应力，如果“Solution Method”设置为“Mode Superposition”（模态叠加法），那么会弹出“Mode Sup Harmonic Analysis”的对话框，如图 14-4 所示，此对话框用于设置最多模态数、最少模态数以及模态输出选项，如果“Solution Method”设置为“Reduced”（减缩法），会弹出“Reduced Harmonic Analysis”的对话框，如图 14-5 所示，此对话框用于设置预应力。

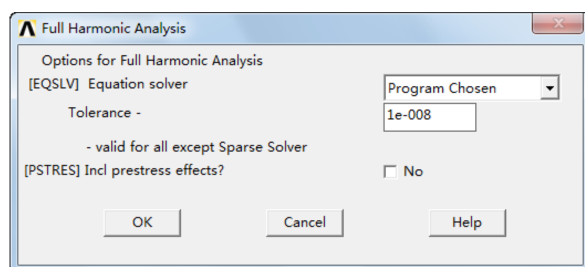


图 14-3 完全法选项

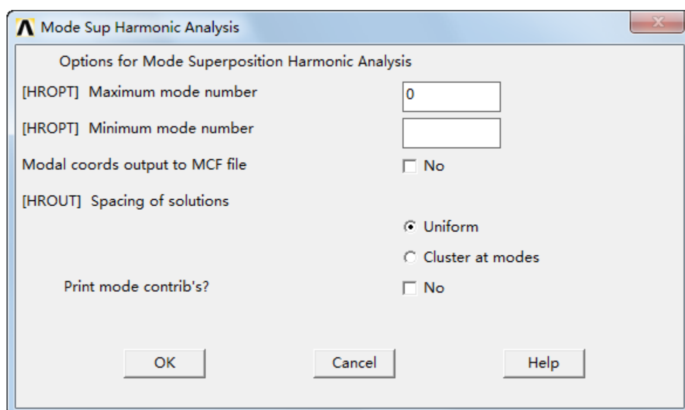


图 14-4 模态叠加法选项

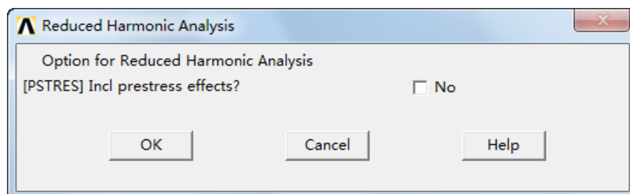


图 14-5 减缩法选项

（6）Equation Solver [EQSLV]：可选的求解器有：“Frontal”求解器(默认)，“Sparse Direct（SPARSE）”求解器，“Jacobi Conjugate Gradient (JCG)”求解器，以及“Incomplete Cholesky Conjugate Gradient (ICCG) ”求解器。对大多数结构模型，建议采用“Frontal”求解器或者“SPARSE”求解器。

（7）Maximum/Minimum mode number [HROPT]：设置模态叠加法时的最多模态数

和最少模态数。

（8）Spacing of solutions [HROUT]：设置模态输出格式。

（9）Incl prestress effects [PSTRES]：选择是否考虑预应力。

3．在模型上加载

根据定义，谐响应分析假定所施加的所有载荷随时间按简谐（正弦）规律变化。指定一个完整的简谐载荷需输入 3 条信息：Amplitude（幅值）、phase angle（相位角）和 forcing frequency range（强制频率范围），如图 14-6 所示。

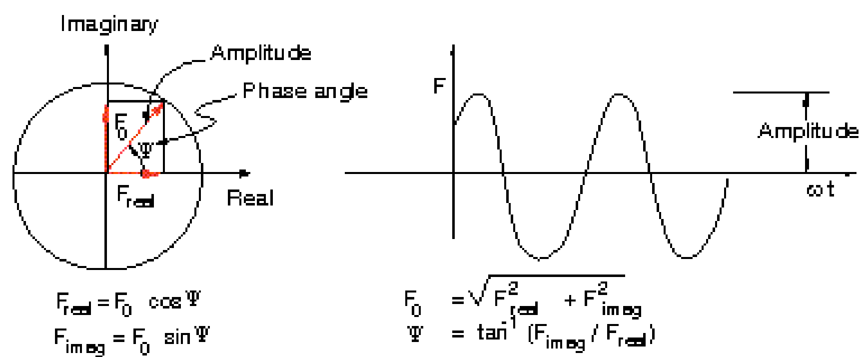


图 14-6 实部/虚部和幅值/相位角的关系

幅值是载荷的最大值，载荷可以用表 14-2、表 14-3 中的命令来指定。相位角是时间的度量，它表示载荷是滞后还是超前参考值，在图 14-6 中的复平面上，实轴（Real）就表示相位角。只有当施加多组有不同相位的载荷时，才需要分别指定其相位角。如图 14-7 所示的不平衡的旋转天线，它将在 4 个支撑点处产生不同相位的垂直方向的载荷，图中实轴表示角度；用户可以通过命令或者 GUI 路径在 VALUE 和 VALUE2 位置指定实部和虚部值，而对于其他表面载荷和实体载荷，则只能指定为 0 相位角（没有虚部），不过有如下例外情况：在用完全法或者振型叠加法（利用 Block Lanczos 方法提取模态，参考相关 SF 和 SFE 命令）求解谐响应问题时，表面压力的非零虚部可以通过表面单元 SURF153 和 SURF154 来指定。实部和虚部的计算参考图 14-6 所示。

表 14-2 在谐响应分析中施加载荷

载荷类型	类别	命令	GUI Path
位移约束	Constraints	D	Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural >Displacement
集中力或者力矩	Forces	F	Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment
压力(PRES)	Surface Loads	SF	Main Menu>Solution >Define Loads > Apply > Structural > Pressure
温度(TEMP) 流体 (FLUE)	Body Loads	BF	Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature
重力，向心力等	Inertia Loads	-	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Other

在分析中，用户可以施加、删除、修正或者显示载荷。

表 14-3 谐响应分析的载荷命令

载荷类型	实体模型或有限元模型	图元	施加载荷	删除载荷	列表显示载荷	对载荷操作	设定载荷
位移约束	实体	Keypoints	DK	DKDELE	DKLIST	DTRAN	-
	实体	Lines	DL	DLDELE	DLLIST	DTRAN	-
	实体	Areas	DA	DADELE	DALIST	DTRAN	-
	有限元	Nodes	D	DDELE	DLIST	DSCALE	DSYM, DCUM
集中力	实体	Keypoints	FK	FKDELE	FKLIST	FTRAN	-
	有限元	Nodes	F	FDELE	FLIST	FSCALE	FCUM
压力	实体	Lines	SFL	SFLDELE	SFLLIST	SFTRAN	SFGRAD
	实体	Areas	SFA	SFADELE	SFALIST	SFTRAN	SFGRAD
	有限元	Nodes	SF	SFDELE	SFLIST	SFSCALE	SFGRAD, SFCUM
	有限元	Elements	SFE	SFEDELE	SFELIST	SFSCALE	SFGRAD, SFBEAM, SFFUN, SFCUM
温度或者流体	实体	Keypoints	BFK	BFKDELE	BFKLIST	BFTRAN	-
	实体	Lines	BFL	BFLDELE	BFLLIST	BFTRAN	-
	实体	Areas	BFA	BFADELE	BFALIST	BFTRAN	-
	实体	Volumes	BFV	BFVDELE	BFVLIST	BFTRAN	-
	有限元	Nodes	BF	BFDELE	BFLIST	BFSCALE	BFCUM
	有限元	Elements	BFE	BFEDELE	BFELIST	BFSCALE	BFCUM
惯性力	-	-	ACEL OMEGA DOMEGA CGLOC CGOMGA DCGOMG	-	-	-	-

载荷的频带是指谐波载荷（周期函数）的频率范围，可以利用 HARFRQ 命令将它作为一个载荷步选项来指定。


谐响应分析不能计算频率不同的多个强制载荷同时作用时产生的响应。这种情况的实例是两个具有不同转速的机器同时运转的情形。但在 POST1 中可以对两种载荷状况进行叠加以得到总体响应。在分析过程中，可以施加，删除载荷或对载荷进行操作或列表。

4．指定载荷步选项

表 14-4 是可以在谐响应分析中使用的选项。

（1）普通选项如图 14-8 所示，具体说明如下：

- Number of Harmonic Solutions [NSUBST]： 可用此选项计算任何数目的谐响应解。解（或子步）将均布于指定的频率范围内[HARFRQ]（详细说明见后）。

例如，如果在 30～40Hz 范围内要求出 10 个解，程序将计算出在频率 31，32，… ，40Hz 处的响应，而不去计算其他频率处。

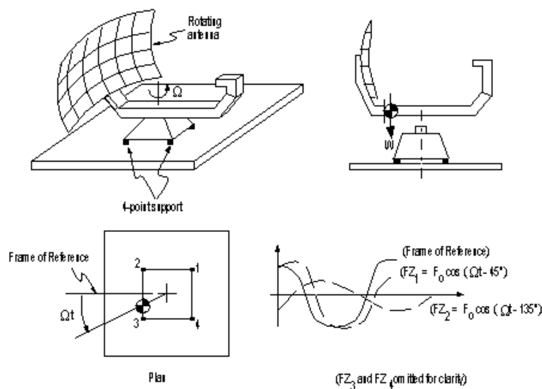


图 14-7 不平衡旋转天线

表 14-4 载荷步选项

选项	命令	GUI 路径
普通选项		
谐响应分析的子步数	NSUBST	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substeps
阶越载荷或者连续载荷	KBC	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time - Time Step or Freq and Substeps
动力选项		
载荷频带	HARFRQ	Main Menu>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Freq and Substeps
阻尼	ALPHAD, BETAD, DMPRAT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
输出控制选项		
输出	OUTPR	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout
数据库和结果文件输出	OUTRES	Main Menu >Solution>Load Step Opts > Output Ctrls > DB/ Results File
结果外推	ERESX	Main Menu>Solution >Load Step Opts > Output Ctrls > Integration Pt

- Stepped or Ramped Loads [KBC]： 载荷可以是 Stepped 或 Ramped 方式变化的，默认时方式是“Ramped”。即载荷的幅值随各子步逐渐增长。而如果用命令[KBC，1]设置了“Stepped”载荷，则在频率范围内的所有子步载荷将保持恒定的幅值。

（2）动力选项具体说明如下：

- Forcing Frequency Range [HARFRQ]：在谐响应分析中必须指定强制频率范围（以周/单位时间为单位）。然后指定在此频率范围内要计算处的解的数目。
- Damping：必须指定某种形式的阻尼，否则在共振处的响应将无限大。Alpha（质量）阻尼 [ALPHAD]; Beta（刚度）阻尼[BETAD]; 恒定阻尼比 [DMPRAT]。

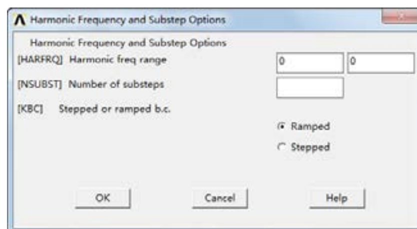


图 14-8 谐响应分析频率和子步选项


在直接积分谐响应分析（用 Full 法或 Reduced 法）中如果没有指定阻尼，程序将默认采用零阻尼。

（3）输出控制选项具体说明如下：

- Printed Output [OUTPR]：此选项用于指定输出文件 Jobname.OUT 中要包含的结果数据。
- Database and Results File Output [OUTRES]：此选项用于控制结果文件 Jobname.RST 中包含的数据。
- Extrapolation of Results [ERESX]：此选项用于设置采用将结果复制到节点处方式而默认的外插方式得到单元积分点结果。

5．保存模型

命令：SAVE。

GUI：Utility Menu > File > Save as。

6．开始求解

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

7．对于多载荷步可重复以上步骤

如果有另外的载荷和频率范围（即另外的载荷步），重复 3～6 步。如果要做时间历程后处理（POST26），则一个载荷步和另一个载荷步的频率范围间不能存在重叠。

8．离开求解器

命令：FINISH。

GUI：Close the Solution menu。

14.2.3 观察模型（后处理）

谐响应分析的结果被保存到结构分析结果文件“Jobname.RST”中。如果结构定义了阻尼，响应将与载荷异步。所有结果将是复数形式的，并以实部和虚部存储。

通常可以用 POST26 和 POST1 观察结果。一般的处理顺序是首先用“POST26”找到临界强制频率：模型中所关注的点产生最大位移（或应力）时的频率，然后用“POST1”在这些临界强制频率处处理整个模型。

- POST1 用于在指定频率点观察整个模型的结果。
- POST26 用于观察在整个频率范围内模型中指定点处的结果。

1．利用 POST26

POST26 描述不同频率对应的结果值，每个变量都有一个响应的数字标号。

（1）用如下方法定义变量：

命令：NSOL 用于定义基本数据（节点位移）

ESOL 用于定义派生数据（单元数据，如应力）

RFORCE 用于定义反作用力数据

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables



FORCE 命令允许选择全部力，总力的静力项、阻尼项或者惯性项。

（2）绘制变量表格（例如不同频率或者其他变量），然后利用“PLCPLX”绘制幅值、相位角、实部或者虚部：

命令：PLVAR, PLCPLX。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > Graph Variables。

Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > Graph。

（3）列表显示变量，利用“EXTREM”命令显示极值，然后利用“PRCPLX”显示幅值、相位角、实部或者虚部：

命令：PRVAR, EXTREM, PRCPLX。

GUI：Main Menu > TimeHist Postpro > List Variables > List Extremes。

Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes。

Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > List。

另外，“POST26”里面还有许多其他函数，例如对变量进行数学运算、将变量移动到数组参数里面等，详细信息可参考 ANSYS 在线帮助文档。

如果想要观察在时间历程里面特殊时刻的结果，可利用“POST1”后处理器。

2．利用 POST1

可以用“SET”命令（或者相应 GUI）读取谐响应分析的结果，不过它只会读取实部或者虚部，不能两者同时读取。结果的幅值是实部和虚部的平方根，如图 14-6 所示。

用户可以显示结构变形形状、应力应变云图等，还可以图形显示矢量，另外还可以利用“PRNSOL，PRESOL，PRRSOL”等命令列表显示结果。

（1）显示变形图

命令：PLDISP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

（2）显示变形云图

命令：PLNSOL or PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu or Element Solu。

 该命令可以显示所有变量的云图，例如应力（SX, SY, SZ...）、应变（EPELX, EPELY, EPELZ...）和位移（UX, UY, UZ...）等。

“PLNSOL”和“PLESOL”命令的“KUND”项表示是否要在变形图里同时显示变形前的图形。

（3）绘制矢量

命令：PLVECT。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined。

（4）列表显示

命令：PRNSOL （节点结果）。

PRESOL （单元结果）。

PRRSOL （反作用力等）。

NSORT, ESORT。

GUI：Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution。

Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution。

在列表显示之前，可以利用 NSORT 和 ESORT 命令对数据进行分类。

另外，POST1 后处理器里面还包含很多其他的功能，例如将结果映射到路径来显示、将结果转换坐标系显示、载荷工况叠加显示等，详细信息可参考 ANSYS 在线帮助文档。

14.3 实例导航——弹簧质子系统的谐响应分析

本实例通过一个弹簧质子的谐响应分析来阐述谐响应分析的基本过程和步骤，谐响应分析有 3 种求解方法：完全法、减缩法、模态叠加法，本例采用的是模态叠加法，如果要采用其他两种方法，步骤也一样。

14.3.1 问题描述

已知一个质量弹簧系统，受到幅值为F_o、频率范围是 0.1～1.0Hz的谐波载荷作用，如图 14-9 所示，求其固有频率和位移响应。材料属性和载荷数值如表 14-5 所示。

表 14-5 材料属性、载荷数值

材料属性	载荷
k_1 = 6 N/m	Fo = 50 N
k_2 = 16 N/m	
m_1 = m_2 = 2 kg	

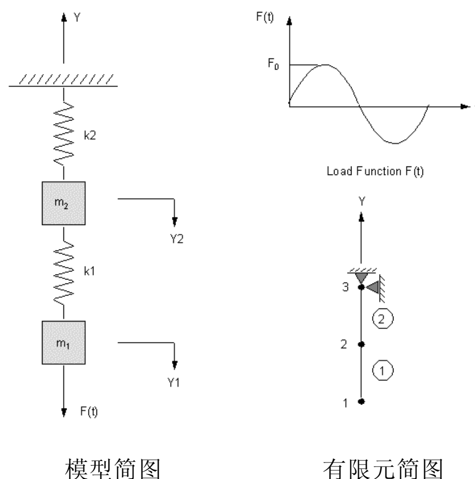


图 14-9 模型简图

14.3.2 GUI模式

01 前处理（建模及分网）。

❶定义工作标题：Utility Menu > File > Change Title，弹出“Change Title”对话框，输入“HARMONIC RESPONSE OF A SPRING-MASS SYSTEM”，如图 14-10 所示，然后单击“OK”按钮。

❷定义单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”对话框，如图 14-11 所示，单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，在左面列表框中选择“Combination”，在右面的列表框中选中“Combination 40”，如图 14-12 所示，单击“OK”按钮，回到图 14-11 所示的对话框。

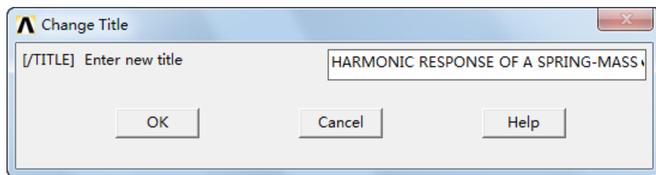


图 14-10 定义工作标题

❸定义单元选项：在图 14-11 所示的对话框中单击“Options”按钮，在弹出的对话框的“Element degree(s) of freedom K3”后面的下拉列表中选择“UY”，如图 14-13 所示，单击“OK”按钮，回到图 14-11 所示的“Element Types”对话框，单击“Close”按钮关闭该对话框。

❹定义第一种实常数：Main Menu > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete，弹出“Real Constants”对话框，如图 14-14 所示，单击“Add”按钮，弹出“Element Types”对话框，如图 14-15 所示。



图 14-11 “Element Types”对话框

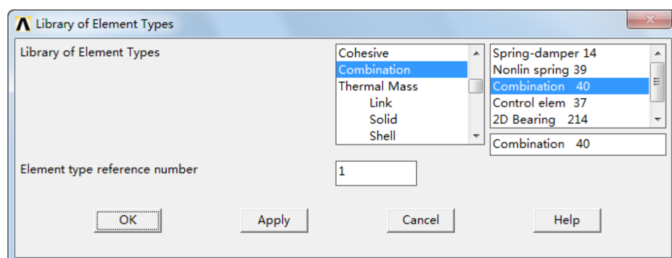


图 14-12 “Library of Element Types”对话框

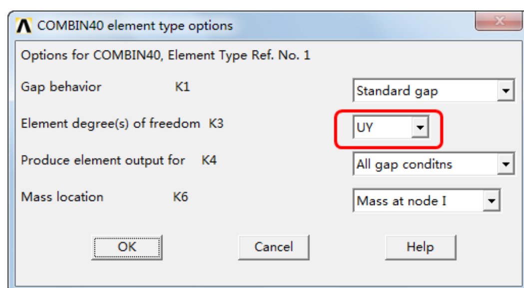


图 14-13 “COMBIN40 element type options”对话框

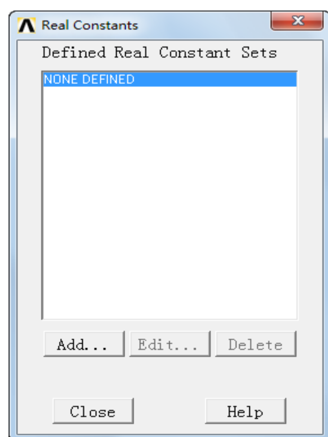


图 14-14 “Real Constant”对话框

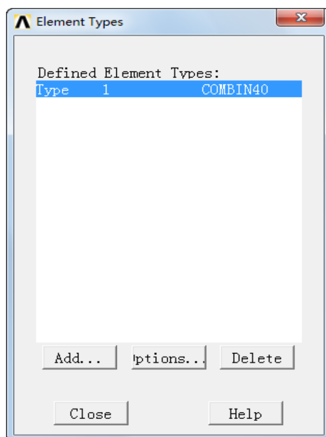


图 14-15 “Element Type”对话框

❺在图 14-15 所示的对话框中单击选取“Type 1 COMBIN40”，单击“OK”按钮。出现“Real Constants Set Number1，for COMBIN40”对话框，在“Spring constant K1”文本框中输入 6，在“Mass M”文本框中输入 2，如图 14-16 所示，单击“Apply”按钮。

❻在弹出的对话框的“Real Constant Set No.”文本框中输入 2，在“Spring constant K1”文本框中输入 16，在“Mass M”文本框中输入 2，如图 14-17 所示，单击“OK”按钮。接着单击“Real Constants”对话框的“Close”按钮关闭该对话框，退出实常数定

义。

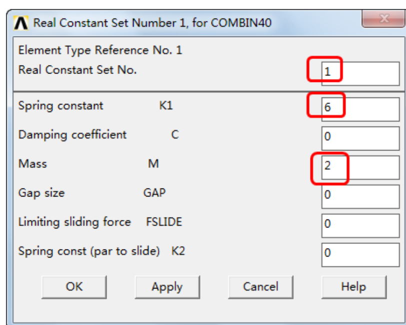


图 14-16　“Real Constants Set Number 1，for COMBIN40”对话框（定义 K1，M1）

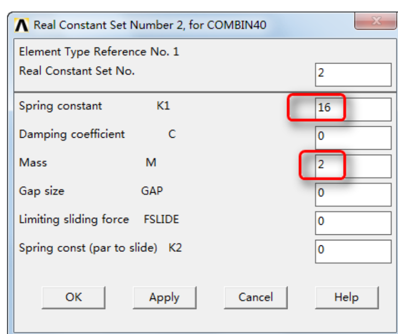


图 14-17　“Real Constants Set Number 2，for COMBIN40”对话框（定义 K1，M2）

❼创建节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框。在“NODE Node number”文本框中输入 1，如图 14-18 所示，在“X,Y,Z　Location in active CS”文本框中分别输入“0、0、0”。单击“Apply”按钮。

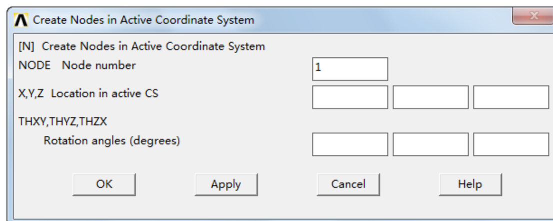


图 14-18　生成第一个节点

❽在“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框中，在“NODE Node number”文本框中输入 3，在“X,Y,Z　Location in active CS”文本框中分别输入“0、2、0”，单击“OK”按钮。

❾打开节点编号显示控制：Utility Menu > PlotCtrls > Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，单击“NODE Node numbers”复选框使其显示为“On”，如图 14-19 所示，单击“OK”按钮。

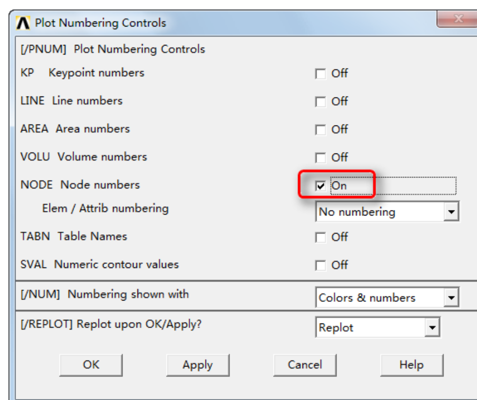


图 14-19 打开节点编号显示控制

⑩插入新节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > Fill between Nds，弹出如图 14-20 所示“Fill between Nds”拾取菜单，用鼠标在屏幕上单击拾取编号为 1 和 3 的两个节点，单击“OK”按钮，弹出“Create Nodes Between 2 Nodes”对话框。单击“OK”按钮接受默认设置，如图 14-21 所示。

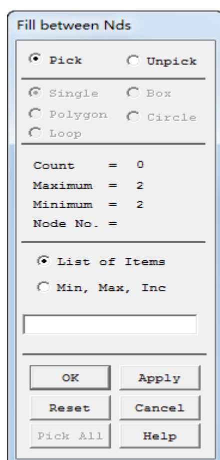


图 14-20 “Fill between Nds”拾取菜单

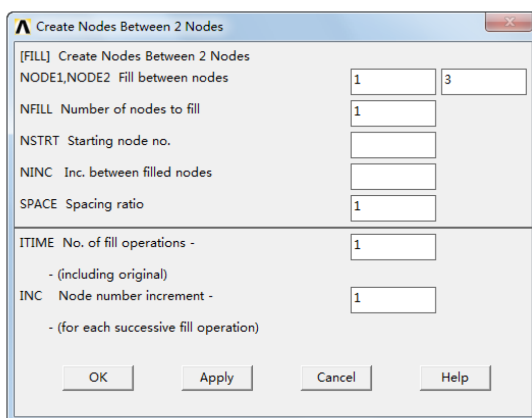


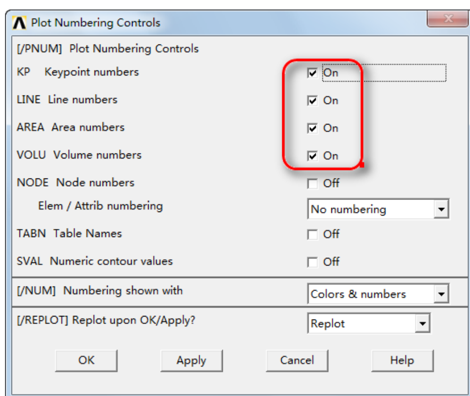
图 14-21 在两节点之间创建节点对话框

⑪选择菜单路径：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options，弹出对话框，在“[/TRIAD] Location of triad”下拉列表中选择“At top left”，单击“OK”按钮关闭该对话框。窗口显示控制对话框设置如图 14-22 所示，此时屏幕显示如图 14-23 所示。

⑫定义梁单元属性：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes，弹出“Elements Attributes”对话框，在“[TYPE] Element type number”下拉列表框中选择“1 COMBIN40”，在“[REAL] Real constant set number”下拉列表中选择 1，如图 14-24 所示。

⑬创建梁单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，弹出“Elements from Nodes”拾取菜单。用鼠标在屏幕上拾取

编号为 1 和 2 的节点，单击“OK”按钮，屏幕上在节点 1 和节点 2 之间出现一条直线。



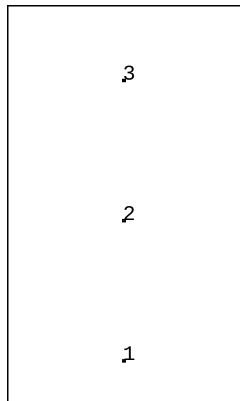
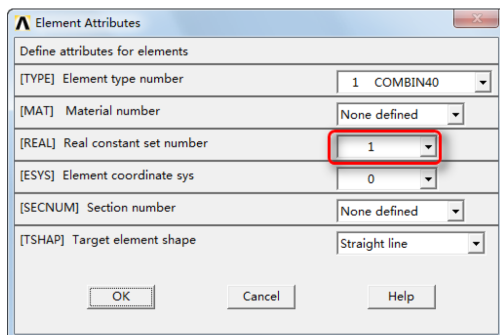


图 14-22 窗口显示控制对话框　　图 14-23 窗口节点显示

⓮定义梁单元属性：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes，弹出“Elements Attributes”对话框，在“[TYPE] Element type number”下拉列表中选择“1 COMBIN40”，在“[REAL] Real constant set number”下拉列表中选择“2”。

⓯创建梁单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes，弹出“Elements from Nodes”拾取菜单。用鼠标在屏幕上拾取编号为 2 和 3 的节点，单击“OK”按钮，屏幕上在节点 2 和节点 3 之间出现一条直线。此时屏幕显示如图 14-25 所示。



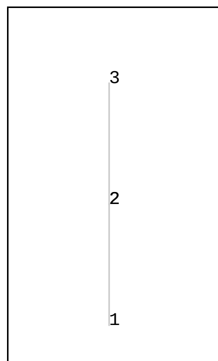


图 14-24 “Elements Attributes”对话框　　图 14-25 单元模型

02 模态分析。

❶定义求解类型：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis。“New Analysis”对话框出现，选中“Modal”，如图 14-26 所示，单击“OK”按钮。

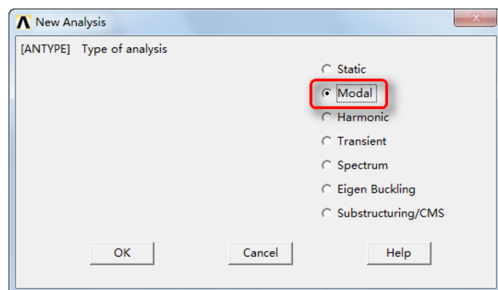


图 14-26 定义分析类型为模态分析

❷设置求解选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，“Modal Analysis”对话框出现，在“[MODOPT] Mode extraction method”单选按钮中选择“Reduced”，在“No. of modes to extrct”文本框中输入“2”，如图 14-27 所示，单击“OK”按钮。

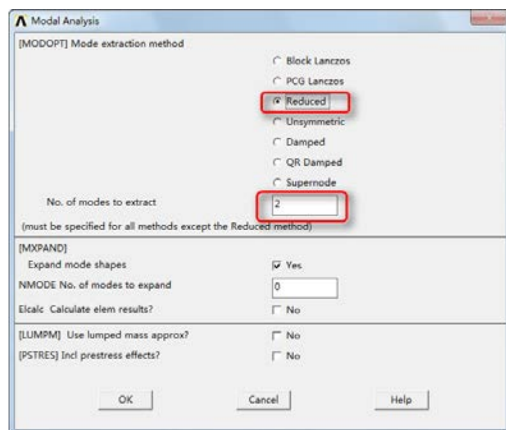


图 14-27 “Modal Analysis”对话框出现

❸弹出“Reduced Modal Analysis”对话框，在“PRMODE”文本框中输入 2，如图 14-28 所示，单击“OK”按钮。

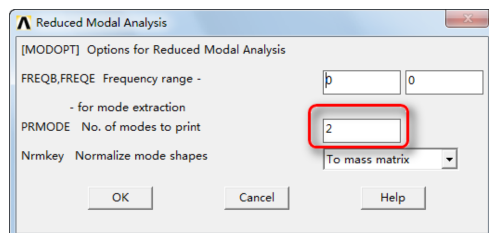


图 14-28 “Reduced Modal Analysis”对话框

❹定义主自由度：Main Menu > Solution > Master DOFs > User Selected > Define，弹出“Define Master DOFs”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取编号为 1 的节点，单击“OK”按钮，弹出“Define Master DOFs”对话框，在“Lab1 1st degree of freedom”下拉列表中

选择“UY”，如图 14-29 所示，单击“Apply”按钮。

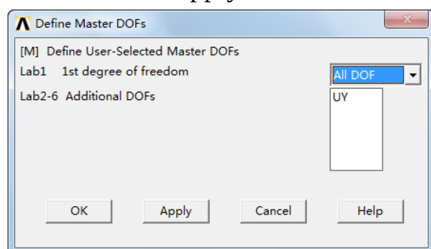


图 14-29 定义主自由度

❺弹出“Define Master DOFs”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取编号为 2 的节点，单击“OK”按钮，弹出“Define Master DOFs”对话框，在“Lab1 1st degree of freedom”下拉列表中选择“UY”，如图 14-29 所示，单击“OK”按钮。

❻施加约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取编号为 3 的节点，单击“OK”按钮，弹出“Apply U,ROT on Nodes”对话框，在“Lab2 DOFs to be constrained”列表框中选择“All DOF”，如图 14-30 所示，单击“OK”按钮。

❼模态分析求解： Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示栏和“Solve Current Load Step”对话框。浏览信息提示栏中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“Solve Current Load Step”对话框的“OK”按钮，开始求解。求解完毕后会出现“Solution is done”的提示框，单击“Close”按钮关闭即可。

❽退出求解器：Main Menu > Finish。

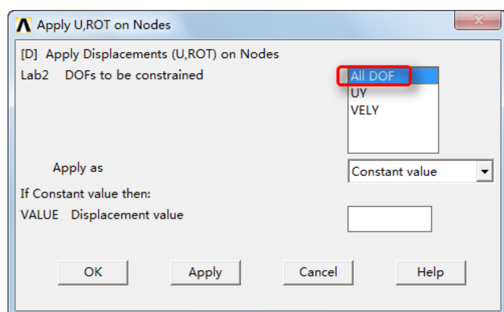


图 14-30 施加约束

03 谐响应分析。

❶定义求解类型：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis。“New Analysis”对话框出现，选中“Harmonic”，如图 14-31 所示，单击“OK”按钮。

❷设置求解选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出“Harmonic Analysis”对话框，在“[HROPT] Solution method”下拉列表中选择“Mode Superpos’n”，如图 14-32 所示，单击“OK”按钮。

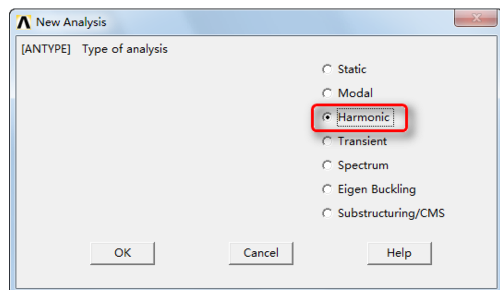


图 14-31 定义分析类型为谐响应分析

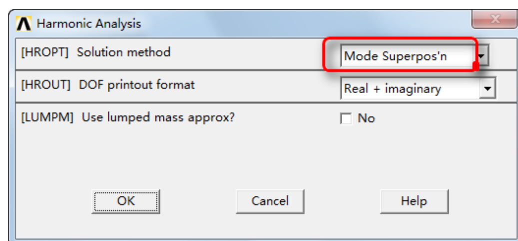


图 14-32 Harmonic Analysis 对话框

❸弹出"Mode Sup Harmonic Analysis"对话框，在"[HROPT] Maximum mode number"文本框中输入 2，如图 14-33 所示，单击"OK"按钮。

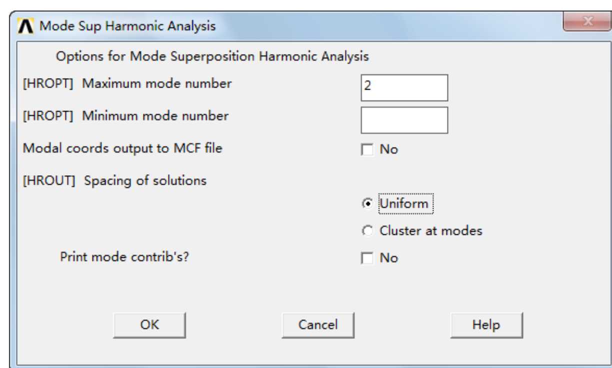


图 14-33 "Mode Sup Harmonic Analysis"对话框

❹施加集中载荷：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes，弹出"Apply F/M on Nodes"拾取菜单，在屏幕上拾取编号为 3 的节点，单击"OK"按钮，弹出"Apply F/M on Nodes"对话框，在"Lab Direction of force/mom"下拉列表中选择"FY"，在"VALUE Real part of force/mom"文本框中输入 50，如图 14-34 所示，单击"OK"按钮。

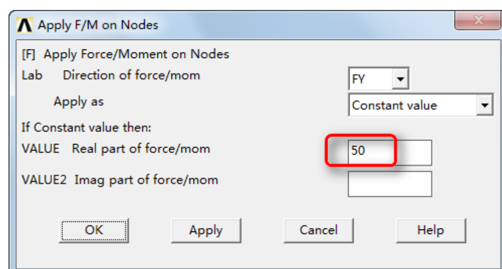


图 14-34 施加载荷

❺设置载荷：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps，弹出"Harmonic Frequency and Substep Options"对话框，在"[NSUBST] Number of substeps"文本框中输入 50，在"[HARFRQ] Harmonic freq range"文本框中依次输入

0.1 和 1，在“[KBC] Stepped or ramped b.c. ”后面单击选择“Stepped”，如图 14-35 所示，单击“OK”按钮。

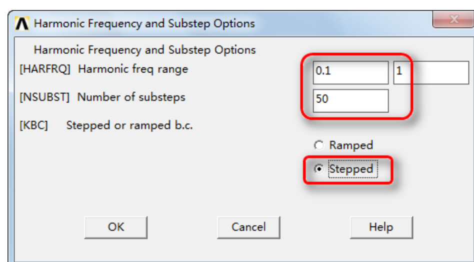


图 14-35 “Harmonic Frequency and Substep Options”对话框

❻设置输出选项：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > DB/Results File，弹出“Controls for Database and Results File Writing”对话框，在“[FREQ] File write frequency”后面单击选中“Every substep”，如图 14-36 所示，单击“OK”按钮。

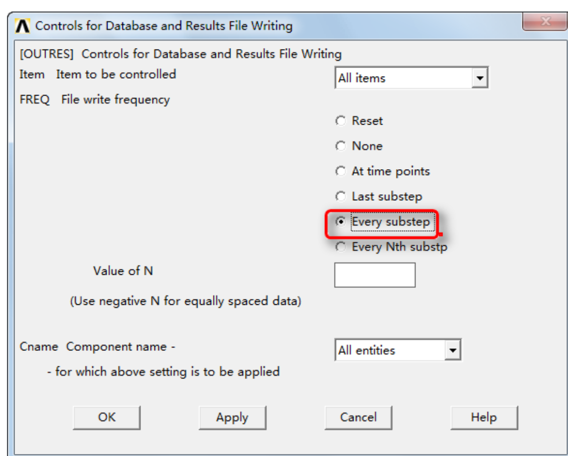


图 14-36 “Controls for Database and Results File Writing”对话框

❼谐响应分析求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示栏和“Solve Current Load Step”对话框。浏览信息提示栏中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“Solve Current Load Step”对话框的“OK”按钮按钮，开始求解。求解完毕后会出现“Solution is done”的提示框，单击“Close”按钮关闭即可。

❽退出求解器：Main Menu > Finish。

04 观察结果（后处理）。

❶进入时间历程后处理：Main Menu > TimeHist PostPro，弹出如图 14-37 所示的“Time History Variables” 对话框，里面已有默认变量频率（FREQ）。

❷定义位移变量 UY1：在图 14-37 所示的对话框中单击左上角的＋按钮，弹出“Add Time-History Variables”对话框，连续单击 Nodal Solution > DOF Solution > Y-Component

of displacement，如图 14-38 所示，在“Variable Name”后面输入“UY_1”，单击“OK”按钮。

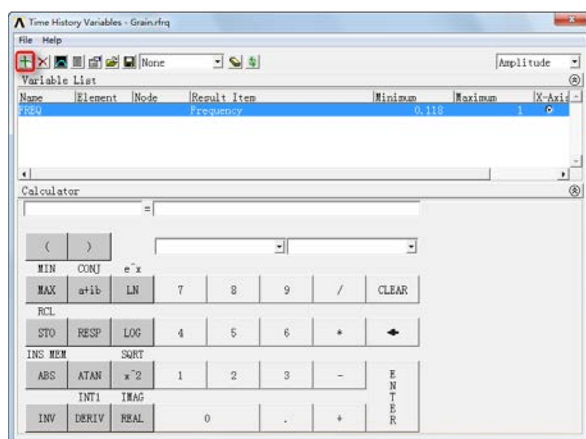


图 14-37 “Time History Variables”对话框（1）

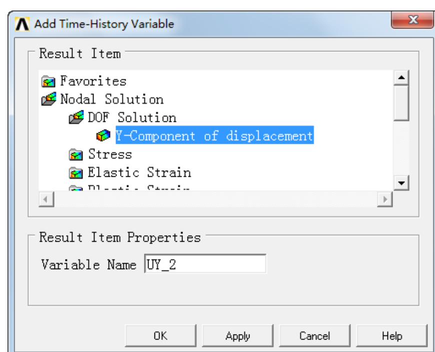


图 14-38 “Add Time-History Variables”对话框

❸弹出“Node for Data”拾取菜单，如图 14-39 所示，在拾取菜单的空白处输入 1，单击“OK”按钮，返回到“Time History Variables”对话框，此时变量列表里面多了一项 UY_1 变量。

❹定义位移变量 UY1：在图 14-37 所示的对话框中单击左上角的＋按钮，弹出“Add Time-History Variables”对话框，连续单击 Nodal Solution > DOF Solution > Y-Component of displacement，如图 14-38 所示，在“Variable Name”文本框中输入“UY_2”，单击“OK”按钮。

❺弹出“Node for Data”拾取菜单，如图 14-39 所示，在拾取菜单的空白处输入 2，单击“OK”按钮。返回到“Time History Variables”对话框，此时变量列表里面多了一项“UY_2”变量，如图 14-40 所示。

❻单击“Time History Variables”对话框左上角的 File > Close 关闭它。

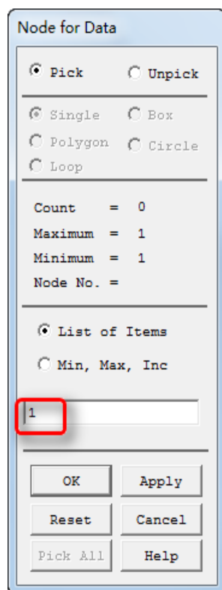


图 14-39 “Node for Data”拾取菜单

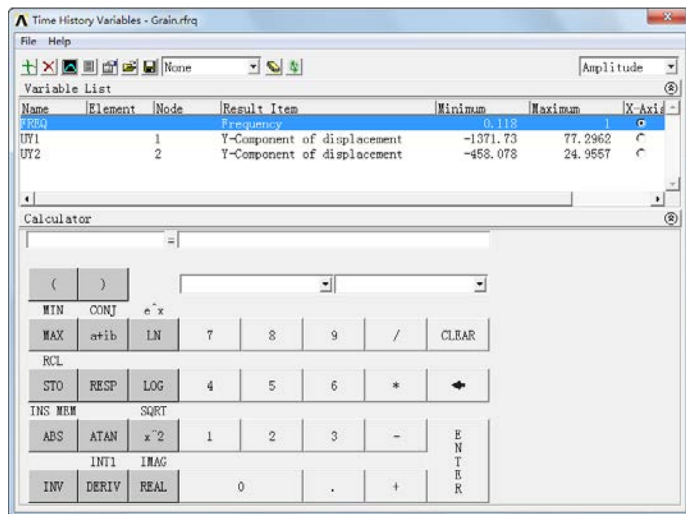


图 14-40 “Time History Variables”对话框（2）

❼设置坐标 1：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Grid，弹出“Grid Modifications for Graph Plots”对话框，在“[/GRID] Type of grid”后面的下拉列表中选择“X and Y lines”，如图 14-41 所示，单击“OK”按钮。

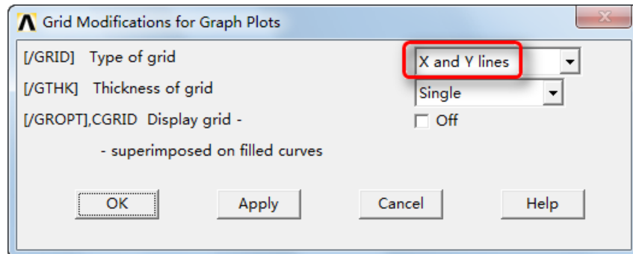


图 14-41 Grid Modifications for Graph Plots 对话框

❽设置坐标 2：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes，弹出“Axes Modifications for Graph Plots”对话框，在“[/AXLAB] Y-axis label”文本框中输入“DISP”，如图 14-42 所示，单击“OK”按钮。

❾绘制变量图：Main Menu > TimeHist PostPro > Graph Variables，弹出“Graph Time-History Variables”对话框，如图 14-43 所示。在“NVAR1”后面输入 2，在“NVAR2”后面输入 3，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 14-44 所示。

❿列表显示变量：Main Menu > TimeHist PostPro > List Variables，弹出“List Time-History Variables”对话框，如图 14-45 所示，在“NVAR1”文本框中输入 2，在“NVAR2”文本框中输入 3，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 14-46 所示。

⓫退出 ANSYS：在“ANAYS Toolbar”中单击“Quit”，选择要保存的项后单击“OK”按钮。

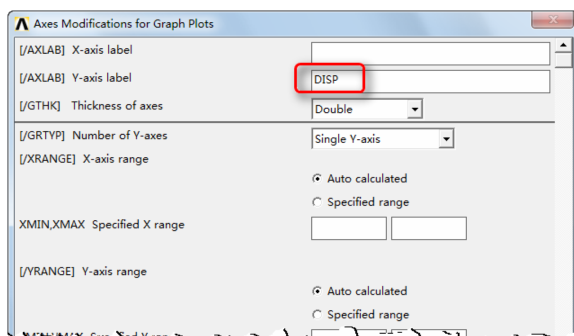


图 14-42 “Axes Modifications for Graph Plots”对话框

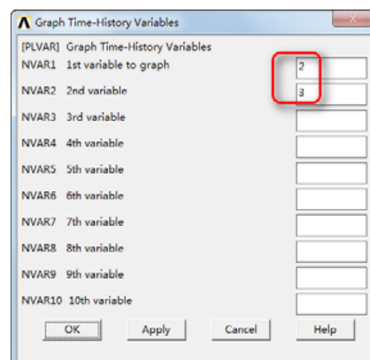


图 14-43 绘制变量时程图对话框

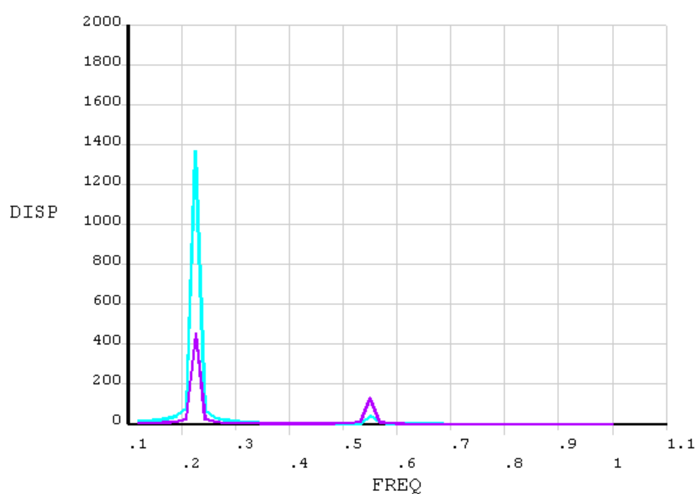


图 14-44 变量时程图显示

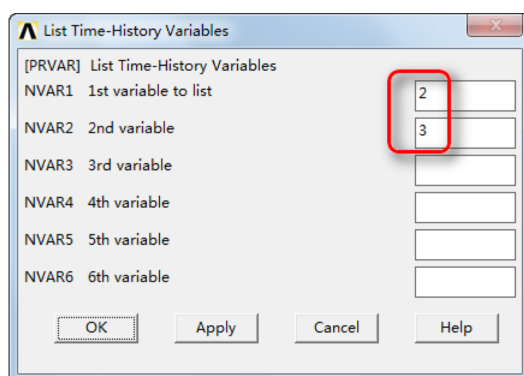


图 14-45 “List Time-History Variables”对话框

PRVAR Command

File

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****

FREQ	1 UY UY1 AMPLITUDE	PHASE	2 UY UY2 AMPLITUDE	PHASE
0.11800	15.7323	0.00000	4.51633	0.00000
0.13600	17.9411	0.00000	5.24091	0.00000
0.15400	21.3780	0.00000	6.37277	0.00000
0.17200	27.2718	0.00000	8.32127	0.00000
0.19000	39.3785	0.00000	12.3381	0.00000
0.20800	77.2962	0.00000	24.9557	0.00000
0.22600	1371.73	180.000	458.078	180.000
0.24400	63.9556	180.000	22.1821	180.000
0.26200	31.4230	180.000	11.3713	180.000
0.28000	20.2652	180.000	7.69087	180.000
0.29800	14.6475	180.000	5.86356	180.000
0.31600	11.2748	180.000	4.79246	180.000
0.33400	9.03007	180.000	4.10710	180.000
0.35200	7.42964	180.000	3.64886	180.000
0.37000	6.22966	180.000	3.34006	180.000
0.38800	5.29321	180.000	3.14028	180.000
0.40600	4.53656	180.000	3.02940	180.000

图 14-46 列表显示变量

14.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 15 章

结构屈曲分析

屈曲分析是一种用于确定结构的屈曲载荷（使结构开始变得不稳定的临界载荷）和屈曲模态（结构屈曲响应的特征形态）的技术。

本章介绍了 ANSYS 屈曲分析的全流程步骤，详细讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过桁架结构屈曲分析实例对 ANSYS 屈曲分析功能进行了具体演示。

学 习 要 点

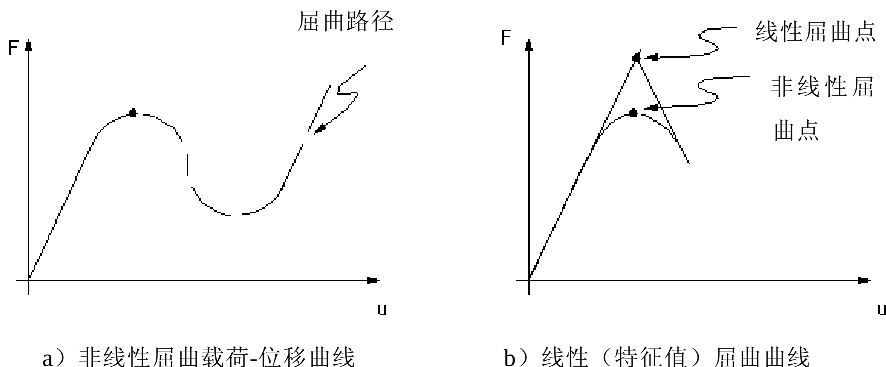
- 结构屈曲概论
- 结构屈曲分析的基本步骤
- 桁架结构屈曲分析

15.1 结构屈曲概论

ANSYS 提供两种分析结构屈曲的技术：

（1）非线性屈曲分析：该方法是逐步的增加载荷，对结构进行非线性静力学分析，然后在此基础上寻找临界点，如图 15-1a 所示。

（2）特征值屈曲分析（线性屈曲分析）：该方法用于预测理想弹性结构的理论屈曲强度（即通常所说的欧拉临界载荷），如图 15-1b 所示。



a）非线性屈曲载荷-位移曲线　　b）线性（特征值）屈曲曲线

图 15-1 屈曲曲线

15.2 结构屈曲分析的基本步骤

15.2.1 前处理

该过程跟其他分析类型类似，但应注意以下两点：

（1）该方法只允许线性行为，如果定义了非线性单元，则按线性处理；

（2）材料的弹性模量“EX”（或者某种形式的刚度）必须定义，材料性质可以线性、各向同性或者各向异性、恒值或者与温度相关。

15.2.2 获得静力解

该过程与一般的静力分析类似，只需记住以下几点：

（1）必须激活预应力影响（PSTRESS 命令或者相应 GUI）

（2）通常只需施加一个单位载荷即可，不过 ANSYS 允许的最大特征值是 1000000，若求解时特征值超过了这个限度，则须施加一个较大的载荷。当施加单位载荷时，求解得到的特征值就表示临界载荷，当施加非单位载荷时，求解得到的特征值乘以施加的载

荷就得到临界载荷。

（3）特征值相当于对所有施加载荷的放大倍数。如果结构上既有恒载荷作用（例如重力载荷）又有变载荷作用（例如外加载荷），需要确保在特征值求解时，由恒载荷引起的刚度矩阵没有乘以放大倍数。通常，为了做到这一点，采用迭代方法。根据迭代结果，不断地调整外加载荷，直到特征值变成 1（或者在误差允许范围内接近 1）。

如图 15-2 所示：一根木桩同时受到重力W_o和外加载荷A作用，为了找到结构特征值屈曲分析的极限载荷A，可以用不同的A进行迭代求解直到特征值接近于 1。

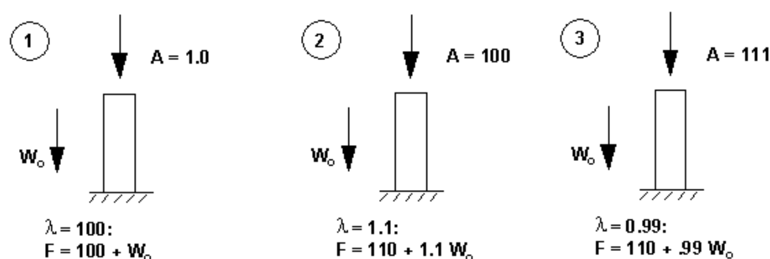


图 15-2 调整外加载荷直到特征值为 1

（4）可以施加非零约束作为静载荷来模拟预应力，特征值屈曲分析将会考虑这种非零约束（即考虑了预应力），屈曲模态不考虑非零约束（即屈曲模态依然是参考零约束模型）。

（5）在求解完成后，必须退出求解器（FINISH 命令或者相应 GUI 路径）

15.2.3 获得特征值屈曲解

该步骤需要静力求解所得的两个文件“Jobname.EMAT”和“Jobname.ESAV”，同时，数据库必须包含模型文件（必要时执行 RESUME 命令），以下是获得特征值屈曲解的详细步骤。

（1）进入求解器

命令：/SOLU。

GUI：Main Menu > Solution。

（2）指定分析类型

命令：ANTYPE,BUCKLE。

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis。



重启动（Restarts）对于特征值分析无效。当指定特征值屈曲分析（eigenvalue buckling）之后，会出现相应的求解菜单（Solution menu），该菜单会根据你最近的操作存在简化形式（abridged）和完整形式（unabridged），简化形式的菜单仅仅包含对于屈曲分析需要或者有效的选项。如果当前显示的是简化菜单而你又想获得其他的求解选项（那些选项对于分析来说是有用的，但对于当前分析类型却没有被激活），可以在

Solution menu 选择 Unabridged Menu 选项，更详细的说明可以参考帮助文档。

（3）指定分析选项

命令：BUCOPT, Method, NMODE, SHIFT。

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options。

无论是命令还是 GUI 路径，都可以指定如下选项（参见图 15-3）：

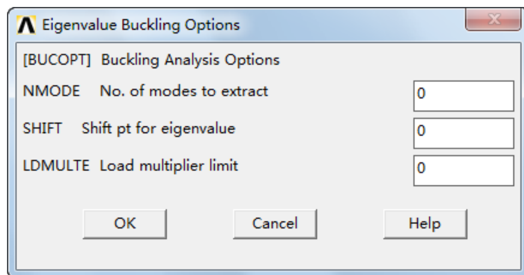


图 15-3 特征值屈曲分析选项

屈曲阶数（NMODE）：指定提取特征值的阶数。该变量默认值是 1，因为我们通常最关心的是第一阶屈曲。

策略（SHIFT），指定特征值要乘的载荷因子（load factor）。该因子在求解遇到数值问题（例如特征值为负值）有用，默认值为 0。

方法（Method）：指定特征值提取方法。可以选择子空间方法（Subspace）和兰索斯分块方法（Block Lanczos），他们都是使用完全矩阵。可在帮助文档中查看选项（Mode-Extraction Method [MODOPT]）以获得更详细的信息。

（4）指定载荷步选项。对于特征值屈曲问题唯一有效的载荷步选项是输出控制和扩展选项：

命令：OUTPR,NSOL,ALL。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrls > Solu Printout。

扩展求解可以被设置成特征值屈曲求解的一部分也可以另外单独执行，在本节中，扩展求解另外单独执行。

（5）保存结果

命令：SAVE。

GUI：Utility Menu > File > Save As。

（6）开始求解

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

求解输出项主要包括特征值（eigenvalues），它被写入输出文件里（Jobname.OUT）。特征值表示屈曲载荷因子，如果施加的是单位载荷，它就表示临界屈曲载荷。数据库或者结果文件中不会写入屈曲模态，所以不能对此进行后处理，如果想对其进行后处理，必须执行扩展解（后面会详细说明）。

特征值可以是正数也可以是负数，如果是负数，则表示应该施加相反方向的载荷。

（7）退出求解器

命令：FINISH。

GUI：Close the Solution menu。

15.2.4 扩展解

不论采用哪种特征值提取方法，如果想得到屈曲模态的形状，就必须执行扩展解。如果是子空间迭代法，可以把“扩展”简单理解为将屈曲模态的形状写入结果文件。

在扩展解中，需要记住以下两点：

必须有特征值屈曲求解得到的屈曲模态文件（Jobname.MODE）。

数据库必须包含跟特征值求解同样的模型。

执行扩展解的具体步骤如下：

（1）重新进入求解器

命令：/SOLU。

GUI：Main Menu > Solution。


在执行扩展解之前必须明确地离开求解器（利用 FINISH 命令），然后重新进入（/SOLU）。

（2）指定为扩展求解

命令：EXPASS,ON。

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > ExpansionPass。

（3）指定扩展求解选项

命令：MXPAND, NMODE, , , Elcalc。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Modes > Expand Modes。

无论是通过命令还是 GUI 路径，扩展求解都需要指定如下选项：

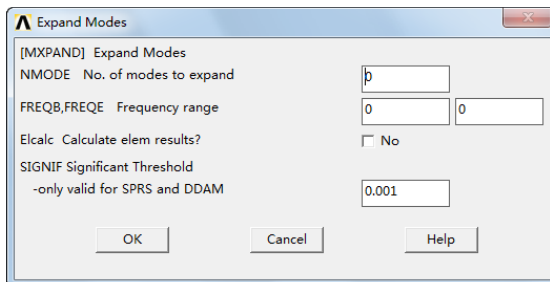


图 15-4　扩展模态选项

模态阶数（MODE）：指定扩展模态的阶数。这个变量默认值是特征值求解时所提取的阶数。

相对应力（Elcalc）：指定是否需要进行应力计算，如图 15-4 所示。特征值屈曲分

析中的应力并非真正的应力，而是相对于屈曲模态的相对应力分布，默认时不计算应力。

（4）指定载荷步选项。在屈曲扩展求解里唯一有效的载荷步选项是输出控制选项，该选项包括输出文件（Jobname.OUT）中的任何结果数据：

命令：OUTPR。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl > Solu Printout。

（5）数据库和结果文件输出。该选项控制结果文件（Jobname.RST）里面的数据：

命令：OUTRES。

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl > DB/Results File。



OUTPR 和 OUTRES 上的 FREQ 域只能是 ALL 或者 NONE，也就是说，要么针对所有模态，要么不针对任何模态，不能只写入部分模态信息。

（6）开始扩展求解。输出数据包含屈曲模态形状，并且，如果需要的话，还可以包含每一阶屈曲模态的相对应力。

命令：SOLVE。

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

（7）离开求解器。这时候可以对结果进行后处理

命令：FINISH。

GUI：Close the Solution menu.。



该处的扩展解是单独作为一个步骤列出，也可以利用 MXPAND 命令（GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Expand Modes）将它放在特征值求解步骤里面执行。

15.2.5 后处理（观察结果）

屈曲扩展求解的结果被写入结构结果文件（Jobname.RST），他们包括屈曲载荷因子、屈曲模态形状和相对应力分布，可以在通用后处理（POST1）里面观察这些结果。



为了在 POST1 里面观察结果，数据库必须包含跟屈曲分析相同的结构模型（必要时可执行 RESUME 命令），同时，数据库还必须包含扩展求解输出的结果文件（Jobname.RST）。

（1）列出现在所有的屈曲载荷因子

命令：SET,LIST。

GUI：Main Menu > General Postproc > Results Summary。

（2）读取指定的模态来显示屈曲模态的形状。每一种屈曲模态都储存在独立的结果步（substep）里面。

命令：SET,SUBSTEP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Load Step。

（3）显示屈曲模态形状

命令：PLDISP。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape。

（4）显示相对应力分布云图

命令：PLNSOL or PLESOL。

GUI：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution。

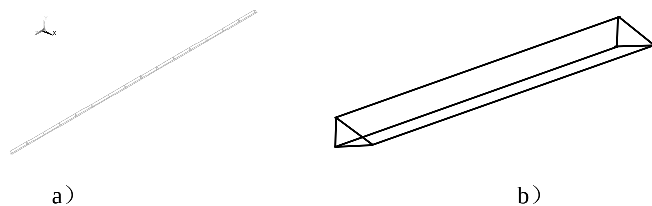
Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solution。

15.3 实例导航——桁架结构屈曲分析

本例通过一个框架结构的屈曲分析实例，详细介绍特征值屈曲分析的过程和技巧。另外，文中还详细介绍了如何利用梁单元表格来作后处理。

15.3.1 问题描述

现有一个框架结构，如图 15-5a所示。框架的端部固支，横截面是边长为 150mm的正三角形构架，框架总长 15m，分成 15 小节，如图 15-5b所示，每小节长 1m。求该结构顶部三角顶点受均匀集中载荷作用时的屈曲临界载荷。已知所有杆件均为空心圆管（内半径 4mm，外半径 5mm），所有接头均为完全焊接。材料弹性模量为 1.5×10^{11} Pa，泊松比为 0.35。



a）　　　　　　　　　　b）

图 15-5 框架结构模型

15.3.2 GUI 路径模式

01 前处理。

❶定义工作标题：Utility Menu > File > ChangeTitle，键入文字“Buckling of a Frame”，单击“OK”按钮。

❷定义单元类型：Mail Menu>Preprocessor>Element Type>All/Edit/Delete，出现“Element Types”对话框，单击“Add”按钮，弹出“Library of Element Types”对话框，如图 15-6 所示，在靠近左边的列表中，单击“Structural Beam”，在靠近右边的列表中，单击“3D 2 node 188”，单击“OK”按钮。最后单击对话框的“OK”按钮，关闭该对

话框。

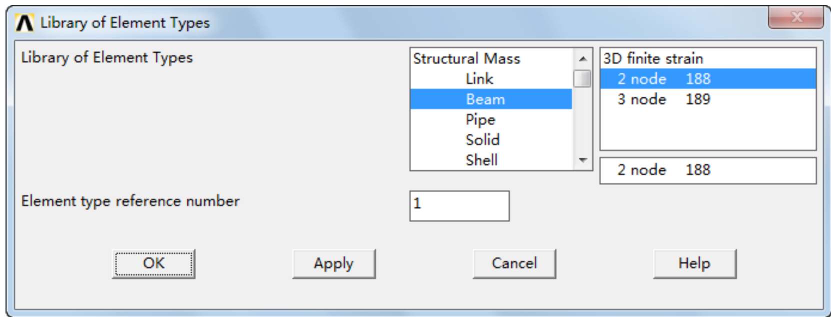
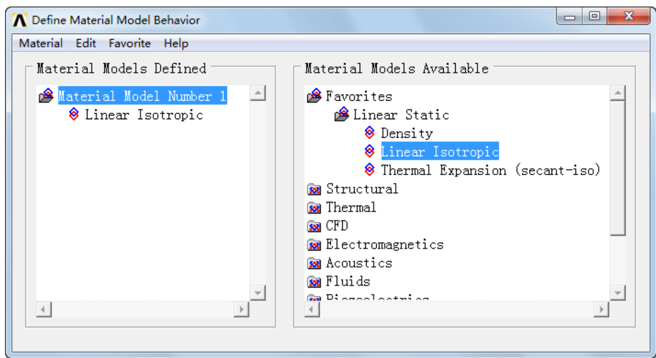
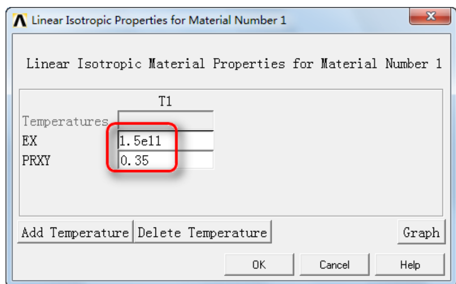


图 15-6 单元类型选择对话框

❸定义材料性质：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models，弹出如图 15-7a 所示的“Define Material Model Behavior”对话框，在“Material Models Available”栏目中连续单击 Favorites > Linear Static > Linear Isotropic，弹出如图 15-7b 所示的“Linear Isotropic Properties for Material Number 1”对话框，在“EX”后键入“1.5e11”，在“PRXY”后键入 0.35，单击“OK”按钮。最后在“Define Material Model Behavior”对话框中，选择菜单路径 Material > Exit，退出材料定义窗口。



a） 材料定义框图



b） 定义线弹性材料属性

图 15-7

❹定义杆件材料性质：Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common

Section，弹出如图 15-8 所示的“Beam Tool”对话框，在“Sub-Type”下拉列表中选择空心圆管，在“Ri”中输入内半径 4，在“Ro”中输入外半径为 5，单击“OK”按钮。

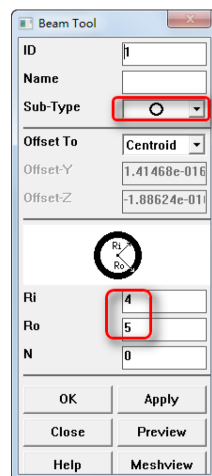
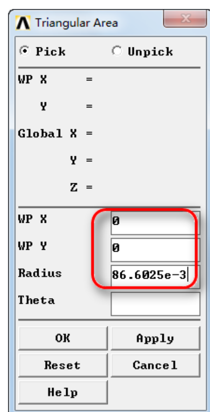


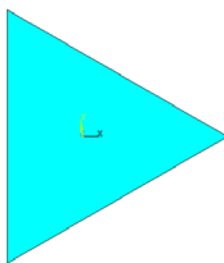
图 15-8 Beam Tool 对话框

❺定义三角形：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Polygon > Triangle，弹出“Triangular Area”对话框，如图 15-9a 所示，在“WP X”后面输入 0，在“WP Y”后面输入 0，在“Radius”后面输入“86.6025e-3”，单击“OK”按钮，显示如图 15-9b 所示。

❻延伸三角形面：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Normal，弹出“Extrude Area along Normal”拾取菜单，用鼠标在屏幕上单击拾取刚建立的三角形，单击“OK”按钮，弹出“Extrude Area along Normal”对话框，如图 15-10 所示，在“DIST”后面输入 1，单击“OK”按钮。



a）“Triangular Area”对话框



b）三角形显示

图 15-9

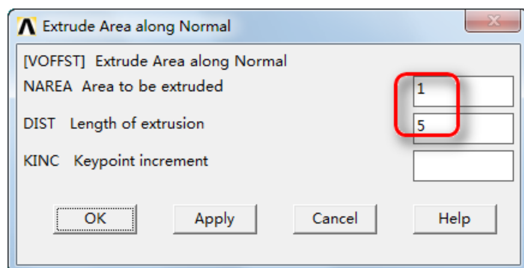


图 15-10 “Extrude Area along Normal”对话框

❼转换视角：单击屏幕窗口右侧的按钮，屏幕显示如图 15-11 所示。

❽删除多余的体：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volumes Only，弹出“Delete Volumes Only”拾取菜单，单击“Pick All”按钮。

❾删除多余面：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Areas Only，弹出“Delete Areas Only”拾取菜单，单击“Pick All”按钮。

❿显示框架：Utility Menu > Plot > Multi-Plots，屏幕显示如图 15-12 所示。

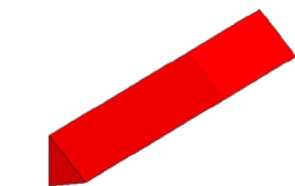


图 15-11 视角转换控制条和三角柱显示

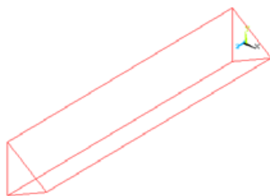


图 15-12 显示三角框架

⓫移动总体坐标符号：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options，弹出“Window Options”对话框，如图 15-13 所示。在“[/TRIAD] Location of triad”后面的下拉列表中选择“At top left”，单击“OK”按钮。

⓬指定单元划分尺寸：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Ctrls > Manual Size > Lines > Pick Lines，弹出“Element Size on Picked Lines”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取所有三角形边框（编号为 L1，L2，L3，L4，L5，L6），单击“OK”按钮，弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，如图 15-14 所示，在“NDIV”后面输入 3，单击“KYNDIV”后面使其显示为“NO”，单击“Apply”按钮。继续弹出“Element Size on Picked Lines”拾取菜单，用鼠标在屏幕上拾取剩余线（编号为 L7，L8，L9），单击“OK”按钮，弹出“Element Size on Picked Lines”对话框，在“NDIV”后面输入 20，单击“KYNDIV”后面使其显示为“NO”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-15 所示。

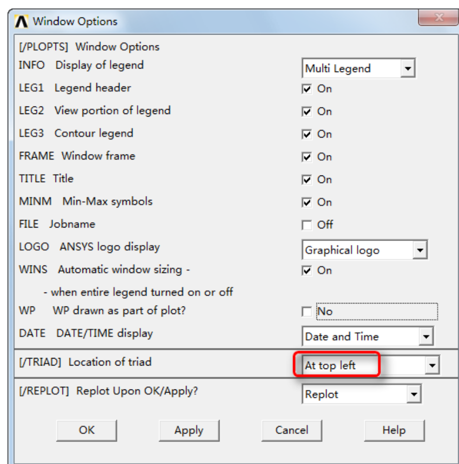


图 15-13 “Window Options”对话框

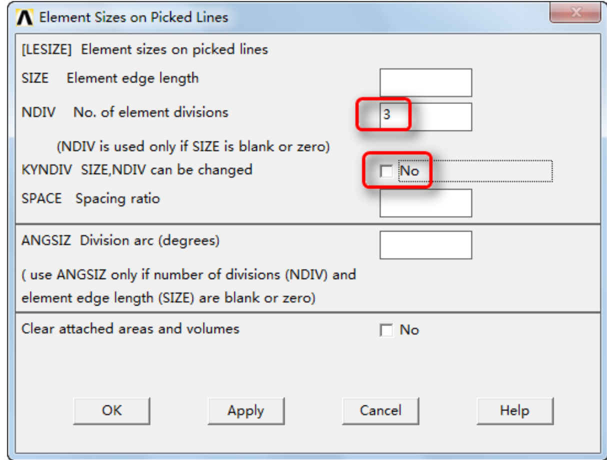


图 15-14 “Element Size on Picked Lines”对话框



在不同机器上操作时，线编号可能稍微有些不同，这是可参考图形。

⑬复制线和单元划分设定：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Copy > Lines，弹出“Copy Lines”拾取菜单，用鼠标单击选择编号为“L4，L5，L6，L7，L8，L9”的线（可参考图 15-15），弹出“Copy Lines”对话框，如图 15-16 所示，在“ITIME Number of copies”后面输入 15，在“DZ Z-offset in active CS”后面输入 1，在“NOELEM”后面的下拉列表中单击选择“Lines and Mesh”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-17 所示。

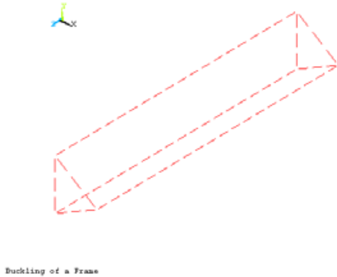


图 15-15 网格划分控制

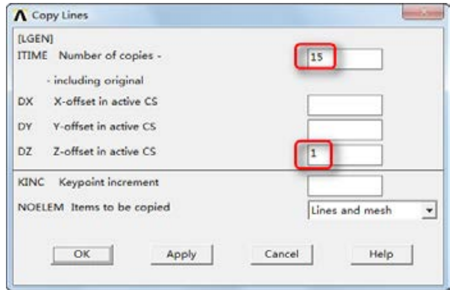


图 15-16 “Copy Lines”对话框



图 15-17 完成复制操作后的屏幕显示

⓮合并关键点和线：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge Items，弹出“Merge Coincident or Equivalently Defined Items”对话框，如图 15-18 所示，在 Label 后面的下拉列表中选择“Keypoints”，单击“OK”按钮。

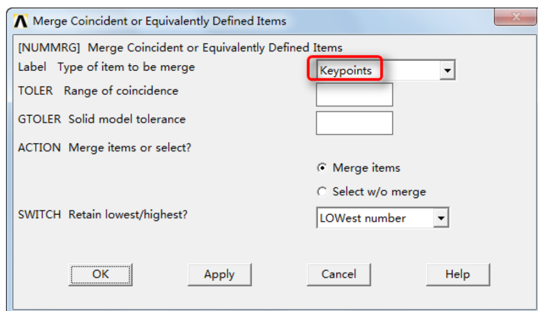


图 15-18 合并关键点和线

⓯压缩关键点和线：Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrls > Compress Numbers，弹出“Compress Numbers”对话框，如图 15-19 所示。在 Label 后面的下拉列表中选择“Keypoints”，单击“Apply”按钮，继续在 Label 后面的下拉列表中选择“Lines”，单击“OK”按钮。

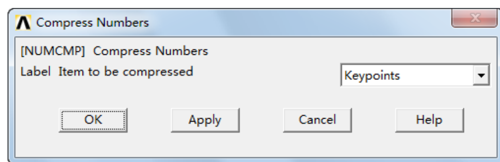


图 15-19 压缩关键点和线

⓰划分单元：Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines，弹出 Mesh Lines 拾取菜单，单击“Pick All”按钮，屏幕显示如图 15-20 所示。

02 获得静力解。

❶设定分析类型：Main Menu > Solution > Unabridged Menu > Analysis Type > New Analysis，弹出“New Analysis”对话框，如图 15-21 所示，单击“OK”按钮接受默认设置（Static）。

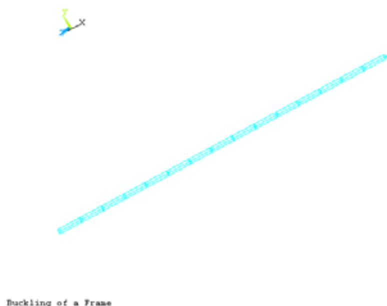


图 15-20 划分网格

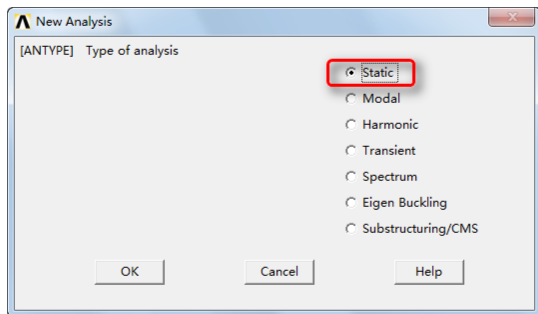


图 15-21 设定分析类型

❷设定分析选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol’n Controls，弹出如图15-22所示的“Solution Controls”对话框，选择“Calculate prestresseffects”选项，单击“OK”按钮。

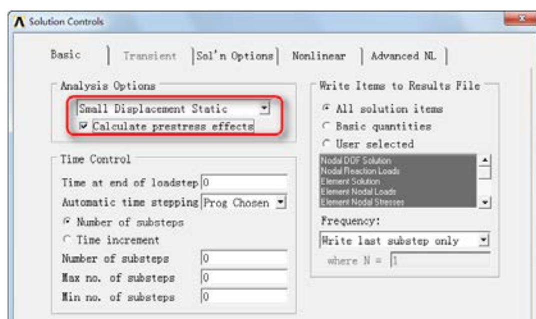


图 15-22 静力分析选项

❸打开节点编号显示：Utility Menu > PlotCtrls > Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”对话框，如图15-23所示，单击“NODE”后面对应项，单击“OK”按钮。

❹定义边界条件：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出“Apply U,ROT on Nodes”拾取菜单。用鼠标在屏幕里面单击拾取三角框架端部（编号为1，2，5，如图15-24所示）的3个节点，单击“OK”按钮，弹出如图15-25所示的“Apply U,ROT on Nodes”对话框，在Lab2后面的列表中单击“All DOF”选项，单击“OK”按钮，屏幕显示如图15-26所示。

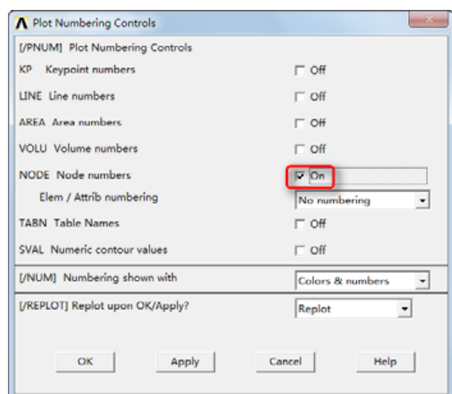


图 15-23 “Plot Numbering Controls”对话框

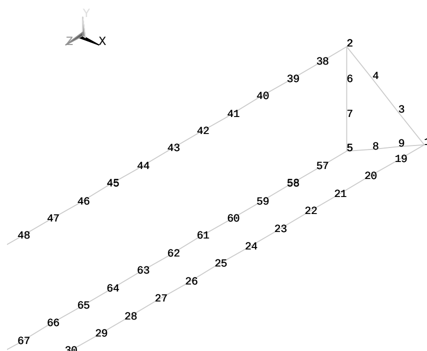


图 15-24 节点显示模式

❺施加载荷：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes，弹出“Apply F/M on Nodes”拾取菜单。用鼠标单击拾取三角框架顶部的3个节点（编号为946，947，950，如图15-27所示），单击“OK”按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”对话框，如图15-28所示。在“Lab Direction of force/mom ”后面的下拉列表中选择“FZ”，在“VALUE Force/moment value”后面输入-1，单击“OK”按钮。屏幕显示如图15-29所示。

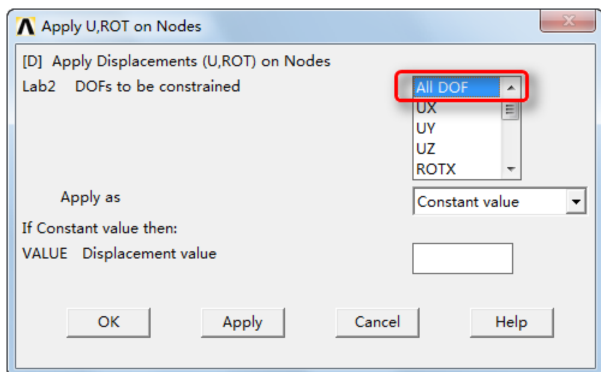


图 15-25 施加位移约束对话框

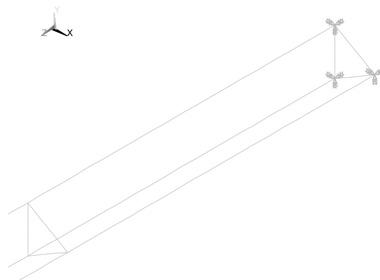


图 15-26 框架端部施加约束

❻静力分析求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示窗口和“Solve Current Load Step”对话框，仔细浏览信息提示窗口中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“OK”按钮开始求解。当静力求解结束时，屏幕上会弹出 Solution is done 提示框，单击“Close”按钮。

❼退出静力求解：Main Menu > Finish。

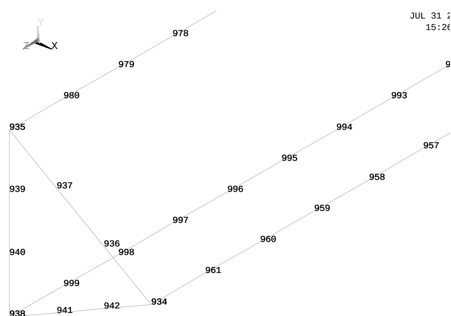


图 15-27 节点编号显示模型

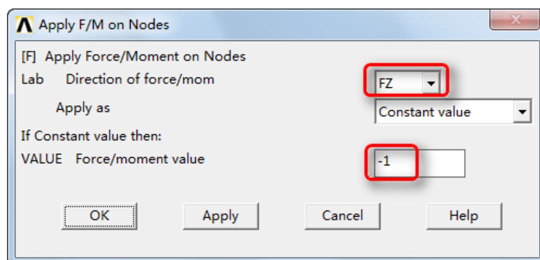


图 15-28 Apply F/M on Nodes 对话框

03 获得特征值屈曲解。

❶屈曲分析求解：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis，弹出如图 15-30 所示的“New Analysis”对话框，在“Type of analysis”后面单击选择“Eigen Buckling”，单击“OK”按钮。

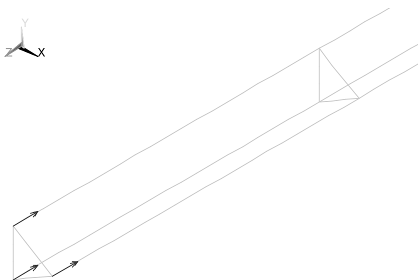


图 15-29 施加位载荷

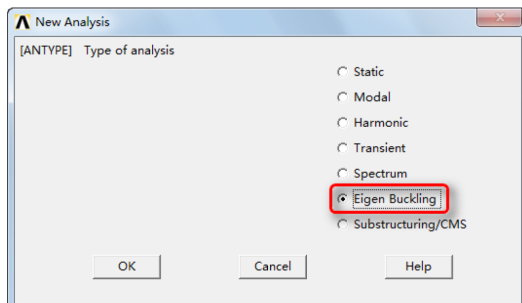


图 15-30 定义新的分析类型（特征值分析）

❷设定屈曲分析选项：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options，弹出“Eigenvalue Buckling Options”对话框，如图 15-31 所示，在“NMODE No. of modes to extract”后面输入 10，单击“OK”按钮。

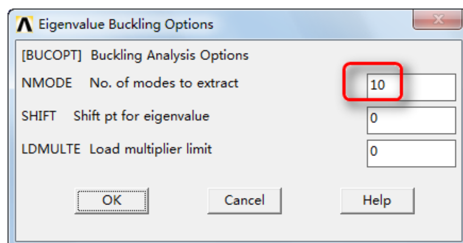


图 15-31 定义屈曲分析选项

❸屈曲求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示窗口和“Solve Current Load Step”对话框。仔细浏览信息提示窗口中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“OK”按钮开始求解。当屈曲求解结束时，屏幕上会弹出“Solution is done”提示框，单击“Close”按钮关闭它。

❹退出屈曲求解：Main Menu > Finish。

04 扩展解。

❶激活扩展过程：Main Menu > Solution > Analysis Type > ExpansionPass，弹出“Expansion Pass”对话框，如图 15-32 所示，单击“[EXPASS] Expansion pass”后面使其显示为“On”，单击“OK”按钮。

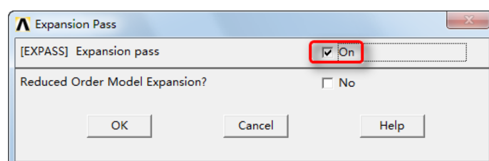


图 15-32 Expansion Pass 对话框

❷设定扩展解：设定扩展模态选项：Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > Expand Modes，弹出如图 15-33 所示的“Expand Modes”对话框，在“NMODE No. of modes to expand”后面输入 10，在“Elcalc”后面单击使其显示为“Yes”，单击“OK”按钮。

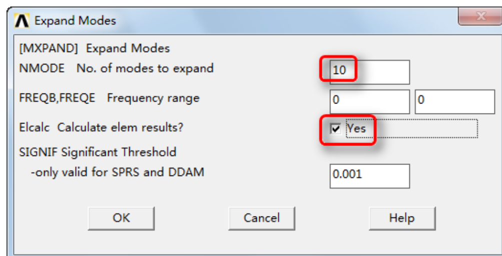


图 15-33 Expand Modes 对话框

❸扩展求解：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出“/STATUS Command”信息提示窗口和“Solve Current Load Step”对话框。仔细浏览信息提示窗口中的信息，如果无误则单击 File > Close 关闭之。单击“OK”按钮开始求解。当屈曲求解结束时，屏幕上会弹出“Solution is done”提示框，单击“Close”关闭它。

❹退出扩展求解：Main Menu > Finish。

05 后处理。

❶列表显示各阶临界载荷：Main Menu > General Postproc > Results Summary，弹出“SET，LIST Command”显示框，如图 15-34 所示。框中“TIME/FREQ”下面对应的数值表示载荷放大倍数，原模型施加的是 3 个单位载荷，所以该放大倍数乘以 3 就表示欧拉临界载荷。

注意 从图 15-34 可以看出，该结构的第一阶临界载荷等于第二阶，第三阶等于第四阶，以次类推，这是因为该框架结构的横截面是正三角形，两个方向的主惯性矩相等。在接下来的后处理中，只考虑奇数阶屈曲解。

❷显示 X 方向视角：在屏幕右端的视角控制框中单击按钮，如图 15-35 所示。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	118.08	1	1	1
2	118.08	1	2	2
3	282.67	1	3	3
4	282.68	1	4	4
5	318.29	1	5	5
6	318.29	1	6	6
7	333.12	1	7	7
8	333.12	1	8	8
9	343.65	1	9	9
10	343.65	1	10	10

图 15-34 列表显示临界载荷



图 15-35 视角控制工具条

注意 之所以选择该视角方向，是因为它是桁架横截面的一个主惯性矩方向，所以该方向是临界失稳发生横向屈曲的一个方向。

❸读入第一阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set。

❹显示第一阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed

Shape，弹出如图 15-36 所示的“Plot Deformed Shape ”对话框，单击“Def + Undef edge”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-37 所示。

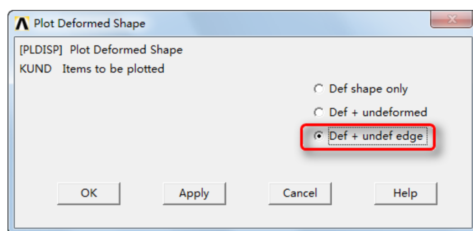


图 15-36 “Plot Deformed Shape” 对话框



图 15-37 第一阶屈曲模态

❺读入第三阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick，弹出“Results File”对话框，如图 15-38 所示，用鼠标单击选择 Set 为 3 的项，单击“Read”按钮。

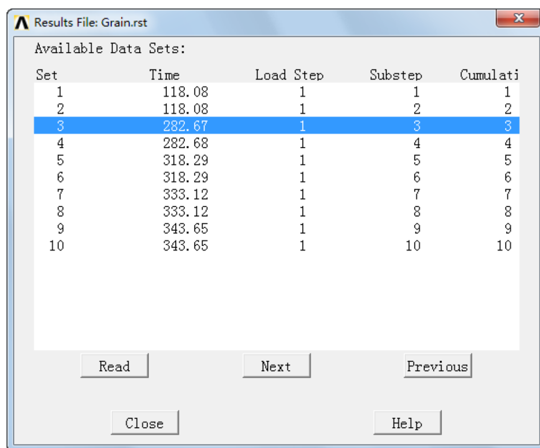


图 15-38 “Results File”对话框

❻显示第三阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape，弹出如图 15-36 所示的对话框，单击“Def + Undef edge”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-39 所示。



图 15-39 第三阶屈曲模态

❼读入第五阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick，弹出如图 15-38 所示对话框，用鼠标单击选择“Set”为“5”的项，单击“Read”按钮。

❽显示五阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape，弹出如图 15-36 所示的对话框，单击“Def + Undef edge”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-40 所示。

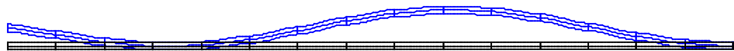


图 15-40 第五阶屈曲模态

❾读入第七阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick，弹出“Results File”对话框，如图 15-38 所示，用鼠标单击选择“Set”为 7 的项，单击“Read”按钮。

❿显示七阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape，弹出如图 15-36 所示的对话框，单击“Def + Undef edge”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-41 所示。

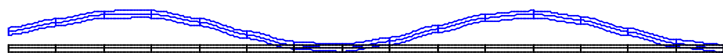


图 15-41 第七阶屈曲模态

⓫读入第九阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Read Results > By Pick，弹出如图 15-38 所示对话框，用鼠标单击选择“Set”为“9”的项，单击“Read”按钮。

⓬显示九阶屈曲模态：Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape，弹出如图 15-36 所示的对话框，单击“Def + Undef edge”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-42 所示。



图 15-42 第九阶屈曲模态



下面对梁内的相对内力作后处理。因为梁不同其他实体单元，它的内力不能直接由节点读出，需另外设定单元表格，详见以下步骤。

⓭读取第一步的结果数据(对应于第一阶屈曲模态)：Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set。

⓮定义单元表格：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table，弹出“Element Table Data”对话框，如图 15-43 所示，单击“Add”按钮，弹出“Define Additional Element Table Items”对话框，如图 15-44 所示，在“Items，Comp Results data item”后面的第一个列表中单击选择“By sequence num”，在第二个下拉列表中单击选择“LS”，

在下面的空白处输入“1”，单击“OK”按钮，接着单击“Element Table Data”对话框的“Close”按钮。

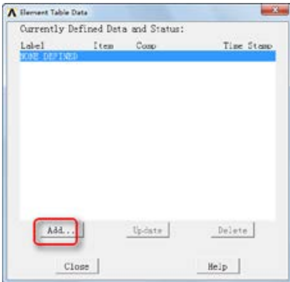


图 15-43 “Element Table Data”对话框

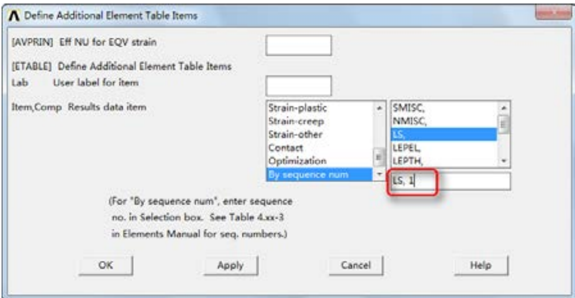


图 15-44 “Define Additional Element Table Items”对话框

注意 图 15-44 的列表中每一项均对应于一种内力（比如弯矩，剪力等），该处选择的轴向应力，其余每项的具体含义可参考帮助文档中关于该单元的说明，如图 15-45 所示。

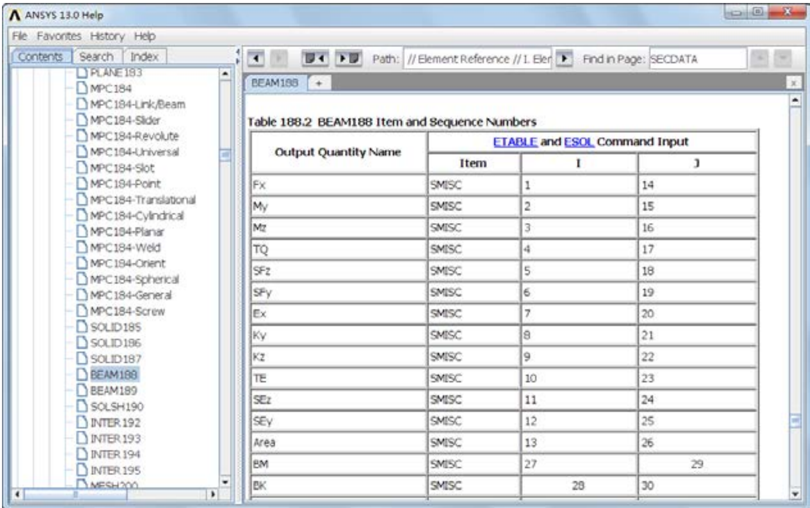


Table 188.2 BEAM188 Item and Sequence Numbers

Output Quantity Name	ETABLE and ESOL Command Input		
	Item	I	J
Fx	SMISC	1	14
My	SMISC	2	15
Mz	SMISC	3	16
TQ	SMISC	4	17
SFz	SMISC	5	18
SFy	SMISC	6	19
Ex	SMISC	7	20
Ky	SMISC	8	21
Kz	SMISC	9	22
TE	SMISC	10	23
SEz	SMISC	11	24
SEy	SMISC	12	25
Area	SMISC	13	26
BM	SMISC	27	29
BK	SMISC	28	30

图 15-45 ANSYS 在线帮助里面有关单元表格项的说明

⑮列表显示单元表格（该处是显示梁的轴向应力）：Main Menu > General Postproc > Element Table > List Elem Table，弹出“List Element Table Data”对话框，如图 15-46 所示，单击选择“LS1”，单击“OK”按钮，弹出如图 15-47 所示的列表框，框中列出了所选择的梁单元的轴向应力。

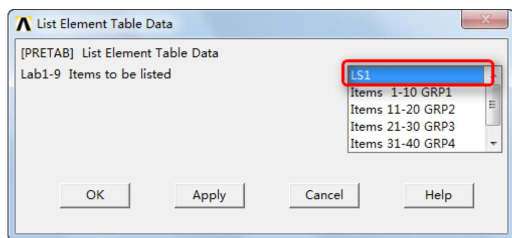
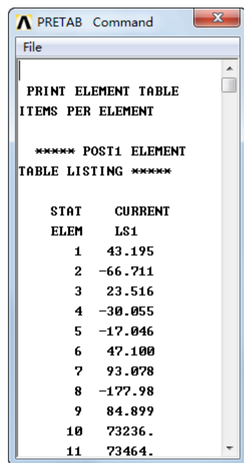


图 15-46 “List Element Table Data”对话框




```
 PRINT ELEMENT TABLE
ITEMS PER ELEMENT

  ***** POST1 ELEMENT
TABLE LISTING *****

    STAT     CURRENT
    ELEM     LS1
       1      43.195
       2     -66.711
       3      23.516
       4     -30.055
       5     -17.046
       6      47.100
       7      93.078
       8     -177.98
       9      84.899
      10      73236.
      11      73464.
```

图 15-47 列表显示单元表格（该处为梁轴向应力）

⑯绘图显示单元表格（该处是显示梁的轴向应力）：Main Menu > General Postproc > Element Table > Plot Elem Table，弹出“Contour Plot of Element Table Data”对话框，如图 15-48 所示，在“Itlab”后面的下拉列表中选择“LS1”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-49 所示。

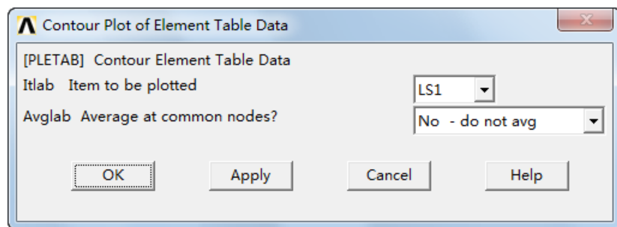


图 15-48 “Contour Plot of Element Table Data”对话框



重复以上步骤可以显示任意阶屈曲模态的轴向应力，下面具体说明显示第十阶。

⑰读取最第十阶屈曲数据：Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set。

⑱定义单元表格：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table，弹出如图 15-43 所示对话框，单击“Add”按钮，弹出如图 15-44 所示对话框，在“Items, Comp Results data item”后面的第一个列表中单击选择“By sequence num”，在第二个下拉列表中单击选择“LS”，在下面的空白处输入 1，单击“OK”按钮，接着单击“Element Table Data”对话框的“Close”按钮。

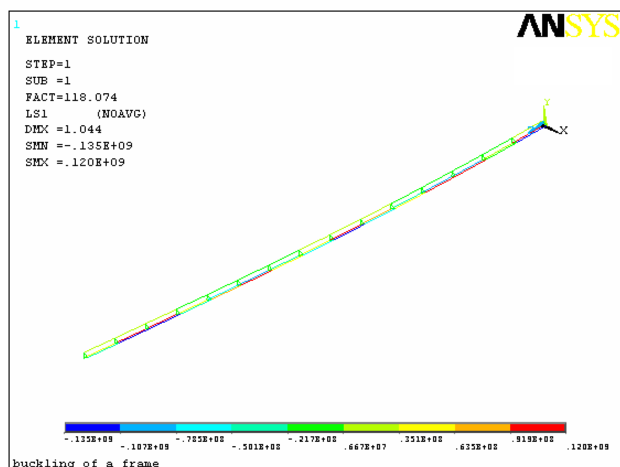


图 15-49 第一阶屈曲模态相对轴向应力

⑲绘图显示单元表格（该处是显示梁的轴向应力）：Main Menu > General Postproc > Element Table > List Elem Table，弹出如图 15-48 所示对话框，在“Itlab”后面的下拉列表中选择“LS1”，单击“OK”按钮，屏幕显示如图 15-50 所示。

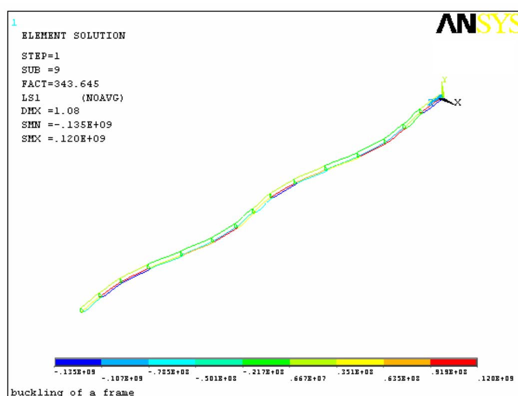


图 15-50 第十阶屈曲模态相对轴向应力

⑳退出 ANSYS：单击“ANSYS Toolbar”上的“QUIT”，弹出“Exit from ANSYS”对话框，选择选择“Quit-No Save”，单击“OK”按钮。

15.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

第 16 章

优化设计

优化设计是一种寻找确定最优设计方案的技术。本章介绍了 ANSYS 优化设计的全流程步骤，详细讲解了其中各种参数的设置方法与功能，最后通过框架结构的优化设计实例对 ANSYS 优化设计功能进行了具体演示。

通过本章的学习，可以完整深入地掌握 ANSYS 优化设计的各种功能和应用方法。

学习要点

- 优化设计概论
- 优化设计的基本步骤
- 框架结构的优化设计

16.1 优化设计概论

所谓“最优设计”，指的是一种方案可以满足所有的设计要求，而且所需的支出最小。即，最优设计方案就是一个最有效率的方案。设计方案的任何方面都是可以优化的，比如说：尺寸（如厚度）、形状（如过渡圆角的大小）、支撑位置、制造费用、自然频率、材料特性等。实际上，所有可以参数化的 ANSYS 选项均可作优化设计。

ANSYS 提供了两种优化的方法，这两种方法可以处理绝大多数的优化问题：零阶方法是一个很完善的处理方法，可以很有效地处理大多数的工程问题；一阶方法基于目标函数对设计变量的敏感程度，因此更加适合于精确的优化分析。对于这两种方法，ANSYS 提供了一系列的分析—评估—修正的循环过程。就是对于初始设计进行分析，对分析结果就设计要求进行评估，然后修正设计。这一循环过程重复进行直到所有的设计要求都满足为止。除了这两种优化方法，ANSYS 还提供了一系列的优化工具以提高优化过程的效率。例如，随机优化分析的迭代次数是可以指定的。随机计算结果的初始值可以作为优化过程的起点数值。

在 ANSYS 的优化设计中包括的基本定义有：设计变量、状态变量、目标函数、合理和不合理的设计、分析文件、迭代、循环、设计序列等。可以参看以下这个典型的优化设计问题：

在以下的约束条件下找出如图 16-1 所示矩形截面梁的最小重量：

总应力σ不超过σ_{max} [$\sigma \le \sigma_{max}$]

梁的变形δ不超过δ_{max}[$\delta \le \delta_{max}$]

梁的高度h不超过h_{max}[$h \le h_{max}$]

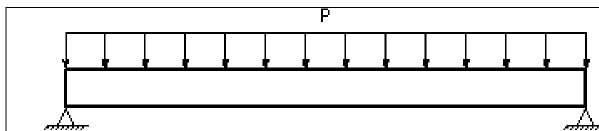


图 16-1 梁的优化设计示例

（1）设计变量“Design Variables（DVs）”：为自变量，往往是长度、厚度、直径或几何模型参数，且为一个独立的参数，优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。每个设计变量都有上下限，它定义了设计变量的变化范围。在以上的问题里，设计变量很显然为梁的宽度b和高度h。b和h都不可能为负值，因此其下限应为b，h > 0，而且，h有上限h_{max}。ANSYS优化程序允许定义不超过 60 个设计变量。

（2）状态变量“State Variables（SVs）”：是约束设计的数值，如应力、温度、热流率、频率、变形等。它们是“因变量，是设计变量的函数，其可能会有上下限，也可能只有单方面的限制，即只有上限或只有下限。在上述梁问题中，有两个状态变量：总应力和梁的位移。在 ANSYS 优化程序中，可以定义不超过 100 个状态变量。

（3）目标函数“Objective Function”：是将要尽量减小的数值。它必须是设计变量

的函数，即，改变设计变量的数值将改变目标函数的数值。在以上的问题中，梁的总重量应是目标函数。在 ANSYS 优化程序中，只能设置一个目标函数，其值必须为正。

设计变量，状态变量和目标函数总称为优化变量。在 ANSYS 优化中，这些变量是由用户定义的参数来指定的。必须指出在参数集中哪些是设计变量，哪些是状态变量，哪是目标函数。

（4）设计序列“design set”：是指确定一个特定模型的参数的集合。一般来说，设计序列是由优化变量的数值来确定的，但所有的模型参数（包括不是优化变量的参数）组成了一个设计序列。

（5）合理的设计“feasible design”：是指满足所有给定的约束条件（设计变量的约束和状态变量的约束）的设计。如果其中任一约束条件不被满足，设计就被认为是不合理的。而最优设计是既满足所有的约束条件又能得到最小目标函数值的设计。如果所有的设计序列都是不合理的，那么最优设计是最接近于合理的设计，而不考虑目标函数的数值。

（6）分析文件“analysis file”：是一个 ANSYS 的命令流输入文件，包括一个完整的分析过程（即前处理、求解、后处理），它必须包含一个参数化的模型，即用参数定义模型并指出设计变量、状态变量和目标函数。并且由这个文件还可以自动生成优化循环文件（Jobname.LOOP），并在优化计算中循环处理。

（7）循环“loop”：一次循环指一个分析周期（可以理解为一次分析文件），最后一次循环的输出存储在文件 Jobname.OPO 中。

（8）优化迭代“optimization iteration”：是产生新的设计序列的一次或多次分析循环，一般来说，一次迭代等同于一次循环，但对于一阶方法，一次迭代等同于多次循环。

优化数据库记录当前的优化环境，包括优化变量定义、参数、所有优化设置和设计序列集合。该数据库可以存储在文件“Jobname.OPT”中，也可以随时读入优化处理器中。

上述的许多概念可以用图解帮助理解，如图 16-2 所示。分析文件必须作为一个单独的实体存在，优化数据库不是 ANSYS 模型数据库的一部分。

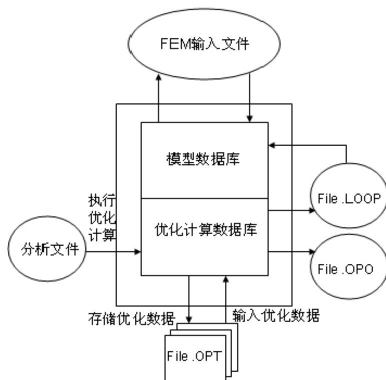


图 16-2 优化数据流向的示意图

16.2 优化设计的基本步骤

ANSYS 优化设计可以通过两种方法来实现，即批处理方式和 GUI 方式。这两种方法的选择取决于对于 ANSYS 的熟悉程度和是否习惯于图形交互方式。

一般来说，如果对于 ANSYS 的命令相当熟悉，即可选择用命令输入整个优化文件并通过批处理方式来进行优化。对于复杂的需用大量机时的分析任务来说(如非线性)，这种方法更有效率。而另一方面，交互方式具有更大的灵活性，而且可以实时看到循环过程的结果。在用 GUI 方式进行优化时，首要的是要建立模型的分析文件，然后优化处理器所提供的功能均可交互式地使用，以确定设计空间，便于后续优化处理的进行。这些初期交互式的操作可以帮助缩小设计空间的大小，使优化过程得到更高的效率。

优化设计通常包括以下几个步骤，这些步骤根据所选用优化方法的不同（批处理或 GUI 方式）而有细微的差别：

（1）生成循环所用的分析文件，该文件必须包括整个分析的过程，而且必须满足以下条件：

- 参数化方式建立模型。
- 求解。
- 提取并指定状态变量和目标函数。

（2）在 ANSYS 数据库里建立与分析文件中变量相对应的参数。这一步是标准的做法，但不是必须的（BEGIN 或 OPT）。

（3）进入 OPT 处理器，指定分析文件（OPT）。

（4）指定优化变量。

（5）选择优化工具或优化方法。

（6）指定优化循环控制方式。

（7）进行优化分析。

（8）查看设计序列结果（OPT）和后处理（POST1/POST26）。

16.2.1 生成分析文件

分析文件生成是 ANSYS 优化设计过程中的关键部分。ANSYS 运用分析文件构造循环文件，进行循环分析。分析文件中可以包括 ANSYS 提供的任意分析类型(结构，热，电磁等，线性或非线性)。

ANSYS/LS-DYNA 的显式动力学分析不能进行优化。

在分析文件中，模型的建立必须是参数化的（通常是优化变量为参数），结果也必须用参数来提取（用于状态变量和目标函数），优化设计中只能使用数值参数。

分析文件应覆盖整个分析过程并且是简练的，不是必须的语句（如完成图形显示功能和列表功能的语句等）应从分析文件中省略掉。只有在交互过程中希望看到的显示

[EPLODT 等]可以包含在分析文件中，或将其定位到一个显示文件中[/SHOW]。请注意分析文件是要多次的，与优化分析本身无关的命令都会不必要的耗费机时，降低循环效率。

建立分析文件有两种方法：

（1）用系统编辑器逐行输入。

（2）交互式地完成分析，将 ANSYS 的 LOG 文件作为基础建立分析文件。

这两种方式各有优缺点：用系统编辑器生成分析文件同生成其他分析时的批处理文件方法是一样的。这种方法使得用户可以通过命令输入来完全地控制参数化定义。同样，本方法可以省去了删除多余命令的麻烦。但是，如果对于 ANSYS 命令集不熟悉的话，这种方法是不方便的；对于这类用户来说，第二种方法相对容易一些。但是，在最后生成分析文件的过程中，ANSYS 的 LOG 文件要做较大的修改才能适合循环分析。

不论采用哪种方法，分析文件需要包括的内容都是一样的。以下说明建立分析文件的步骤：

1．参数化建立模型

用设计变量作为参数建立模型的工作是在 PREP7 中完成的。在给出的梁的例子中，设计变量是 B（梁的宽度）和 H（梁的高度），因此单元的实参是由 B 和 H 来表示的：

...

```
/PREP7                          ！初始化设计变量：
B=2.0
H=3.0
！
ET，1，BEAM3                    ！2-D 梁单元
AREA=B*H                        ！梁的横截面面积
IZZ=(B*(H**3))/12               ！绕 Z 轴的转动惯量
R，1，AREA，IZZ，H              ！以设计变量表示的单元实参
！
！模型的其他部分
MP，EX，1，30E6                 ！弹性模量
N，1                            ！节点
N，11，120
FILL
E，1，2                         ！单元
EGEN，10，1，-1
FINISH                          ！退出 PREP7
…
```

前面提到，可以对设计的任何方面进行优化：尺寸、形状、材料性质、支撑位置、所加载荷等，唯一要求就是将其参数化。

设计变量（例如 B 和 V）可以在程序的任何部分初始化，一般是在 PREP7 中定义。这些变量的初值只是在设计计算的开始用得到，在优化循环过程中会被改变。

如果用 GUI 模式完成输入，可能会遇到直接用鼠标拾取（picking）的操作。有些拾

取操作是不允许参数化输入的。因此，应避免在定义设计变量、状态变量和目标函数时使用这些操作，应用可以参数化的操作来代替。

2．求解

求解器用于定义分析类型和分析选项，施加载荷，指定载荷步，完成有限元计算。分析中所用到的数据都要指出：凝聚法分析中的主自由度，非线性分析中的收敛准则，谐波分析中的频率范围等。载荷和边界条件也可以作为设计变量。

梁的例子中，SOLUTION 部分的输入大致如下：

```
…
/SOLU
ANTYPE,STATIC                    ！静力分析(默认)
D，1，UX，0，，11，10，UY        ！UX=UY=0，梁两端节点固定
SFBEAM，ALL，1，PRES，100            ！施加压力
SOLVE
FINISH                           ！退出 SOLUTION
```

这一步骤不仅仅限于一次分析过程。比如，可以先进行热分析再进行应力分析（在热应力计算中）。

3．参数化提取结果

在本步中，提取结果并赋值给相应的参数。这些参数一般为状态变量和目标函数。提取数据的操作用*GET 命令（Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data）实现。通常用 POST1 来完成本步操作，特别是涉及到数据的存储，加减或其他操作。

在梁的例题中，梁的总重量是目标函数。因为重量与体积成比例（假定密度是均匀的），那么减小总体积就相当于减小总重量。因此可以选择总体积为目标函数。在此例中，状态变量选择为总应力和位移。这些参数可以用如下方法定义：

```
…
/POST1
SET，…
NSORT，U，Y                          ！以 UY 为基准对节点排序
*GET，DMAX，SORT，，MAX              ！参数 DMAX=最大位移
！
！线单元的推导数值由 ETABLE 得出
ETABLE，VOLU，VOLU                   ！VOLU=每个单元的体积
ETABLE，SMAX_I，NMISC，1             ！SMAX_I=每个单元 I 节点处应力的最大值
ETABLE，SMAX_J，NMISC，3             ！SMAX_J=每个单元 J 节点处应力的最大值
！
SSUM                                 ！将单元表中每列的数据相加
*GET，VOLUME，SSUM，，ITEM，VOLU
                                     ！参数 VOLUME=总体积
ESORT，ETAB，SMAX_I，，1             ！按照单元 SMAX_I 的绝对值大小排序
*GET，SMAXI，SORT，，MAX             ！参数 SMAXI=SMAX_I 的最大值
ESORT，ETAB，SMAX_J，，1             ！按照单元 SMAX_J 的绝对值大小排序
*GET，SMAXJ，SORT，，MAX             ！参数 SMAXJ=SMAX_J 的最大值
```

```
SMAX=SMAXI > SMAXJ                    ! 参数 SMAX=最大应力值
FINISH
…
```

4．分析文件的准备

到此为止，我们已经对于分析文件的基本需求做了说明。如果是用系统编辑器来编辑的批处理文件，那么简单地存盘进入第二步即可。如果是用交互方式建模的话，必须在交互环境下生成分析文件。可以通过两种方式完成本步操作：数据库命令流文件或程序命令流文件。

数据库命令流文件——可以通过 LGWRITE 命令（Utility Menu > File > Write DB Log File）生成命令流文件。LGWRITE 将数据库内部的命令流写到文件 Jobname.LGW 中。内部命令流包含了生成当前模型所用的所有命令。

程序命令流文件—Jobname.LOG 包含了交互方式下输入的所有命令。如果用 Jobneme.LOG 作为分析文件时，必须用系统编辑器删除文件中所有不必要的命令。因为在交互方式下，所有的操作都记录在 LOG 文件中，编辑工作会比较烦琐。而且，如果分析是在几个过程中完成的，就必须将几个 LOG 文合在一起编辑生成一个完整的分析文件。

16.2.2 建立优化过程中的参数

在完成了分析文件的建立以后，即可开始优化分析了（如果是在系统中建立的分析文件的话，就要重新进入 ANSYS）如果在交互方式下进行优化的话，最好（但不是必须）从分析文件中建立参数到 ANSYS 数据库中来（在批处理方式下除外）。

做这一步有两个好处。初始参数值可能作为一阶方法的起点，而且，对于各种优化过程来说，参数在数据库中可以在 GUI 下进行操作，便于定义优化变量。建立数据库参数可以选择下列任一种方法：

(1) 读入与分析文件相联的数据库文件（Jobname.DB）。这样可以在 ANSYS 中建立整个模型的数据库。读入数据库文件可以用如下方法：

命令：RESUME

GUI：Utility Menu > File > Resume Jobname.db

Utility Menu > File > Resume from

(2) 将分析文件直接读入 ANSYS 进行整个分析。这样将重新建立整个数据库，但对于大模型来说要耗费大量的机时。要读入分析文件，可以选择下列方法：

命令：/INPUT

GUI：Utility Menu > File > Read Input from

(3) 仅从存储的参数文件中读参数到 ANSYS 中，参数文件是用 PARSAV 命令或由 Utility Menu > Parameters > Save Parameters 存储的。读入参数可以用下列方法之一：

命令：PARRES

GUI：Utility Menu > Parameters > Restore Parameters

(4) 重新定义分析文件中存在的参数。不过，这样做需要知道分析文件中定义了那些参数。用以下任一方式：

命令：*SET or “=”

GUI：Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters

可以选择使用以上任意一种方式，然后用 OPVAR 命令(菜单路径 Main Menu > Design Opt > Design Variables)来指定优化变量。

在优化过程中，ANSYS 数据库不一定要同分析文件一致。模型的输入是在优化循环过程中由分析文件中自动读入的。

16.2.3 进入OPT处理器，指定分析文件

以下的步骤是由 OPT 处理器来完成的。首次进入优化处理器时，ANSYS 数据库中的所有参数自动作为设计序列 1。这些参数值假定是一个设计序列。进入优化处理器可以用如下方式：

命令：/OPT

GUI：Main Menu > Design Opt

在交互方式下，必须指定分析文件名。这个文件用于生成优化循环文件“Jobname.LOOP”。分析文件名无默认值，因此必须输入。指定分析文件名，其命令如下：

命令：OPANL

GUI：Main Menu > Design Opt > Assign

在批处理方式下，分析文件通常是批命令流的第一部分，从文件的第一行到命令/OPT 第 1 次出现。在批处理方式中，默认的分析文件名是“Jobname.BAT”（它是一个临时性的文件，是批处理输入文件的一个复制）。因此，在批处理方式下通常不用指定分析文件名。但是，如果出于某种考虑将批文件分成两个部分（一个用于分析，另一个用于整个优化分析），那么就必须在进入优化处理器后指定分析文件[OPANL]。

在分析文件中，“/PREP7”和“/OPT”命令必须出现在行的第 1 个非零字符处（即，不允许有诸如$等符号出现在有这些命令的行中）。这一点在生成优化循环文件时很关键。

16.2.4 指定优化变量

指定优化变量即要求指定哪些参数是设计变量，哪些参数是状态变量，哪个参数是目标函数。以上提到，允许有不超过 60 个设计变量和不超过 100 个状态变量，但只能有一个目标函数。指定优化变量可以用如下的方法：

命令：OPVAR

GUI：Main Menu > Design Opt > Design Variables

Main Menu > Design Opt > State Variables

Main Menu > Design Opt > Objective

对于设计变量和状态变量可以定义最大和最小值。目标函数不需要给定范围。每一个变量都有一个公差值，这个公差值可以由用户输入，也可以选择由程序计算得出。

如果用 OPVAR 命令定义的参数名不存在，ANSYS 数据库中将自动定义这个参数，并将初始值设为零。

可以在任意时间简单地通过重新定义参数的方法来改变已经定义过的参数，也可以删除一个优化变量[OPVAR，Name，DEL]。这种删除操作并不真正删除这个参数，而是不将它继续作为优化变量而已。

16.2.5 选择优化工具或优化方法

ANSYS 提供了一些优化工具和方法。默认方法是单次循环。指定后续优化的工具和方法用下列命令：

命令：OPTYPE

GUI：Main Menu > Design Opt > Method/Tool

优化方法是使单个函数（目标函数）在控制条件下达到最小值的传统化的方法。有两种方法是可用的：零阶方法和一阶方法。除此之外，可以提供外部的优化算法替代 ANSYS 本身的优化方法。使用其中任何一种方法之前，必须先定义目标函数。

（1）零阶方法（直接法)：这是一个完善的零阶方法，使用所有因变量（状态变量和目标函数）的逼近。该方法是通用的方法，可以有效地处理绝大多数的工程问题。

（2）一阶方法（间接法）：本方法使用偏导数，即，使用因变量的一阶偏导数。此方法精度很高，尤其是在因变量变化很大，设计空间也相对较大时。但是，消耗的机时较多。

（3）提供的优化方法：外部的优化程序（USEROP）可以代替 ANSYS 优化过程。

优化工具是搜索和处理设计空间的技术。因为求最小值不一定是优化的最终目标，所以目标函数在使用这些优化工具时可以不指出。但是，必须要指定设计变量。下面是可用的优化工具：

（1）单步运行：实现一次循环并求出一个 FEA 解。可以通过一系列的单次循环，每次求解前设置不同的设计变量来研究目标函数与设计变量的变化关系。

（2）随机搜索法：进行多次循环，每次循环设计变量随机变化。可以指定最大循环次数和期望合理解的数目。本工具主要用来研究整个设计空间，并为以后的优化分析提供合理解。

（3）等步长搜索法：以一个参考设计序列为起点，本工具生成几个设计序列。它按照单一步长在每次计算后将设计变量在变化范围内加以改变。对于目标函数和状态变量的整体变化评估可以用本工具实现。

（4）乘子计算法：是一个统计工具，用来生成由各种设计变量极限值组合的设计序列。这种技术与称之为经验设计的技术相关，后者是用二阶的整体和部分因子分析。主

要目标是计算目标函数和状态变量的关系和相互影响。

（5）最优梯度法：对指定的参考设计序列，本工具计算目标函数和状态变量对设计变量的梯度。使用本工具可以确定局部的设计敏感性。

（6）提供的优化工具：可以用外部过程(USEROP)替代 ANSYS 优化工具。也可以通过 USEROP 过程将自己的方法和工具补充进去。

16.2.6 指定优化循环控制方式

每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，比如最大迭代次数等。所有这些控制参数的设置都在同一个路径下：GUI：Main Menu > Design Opt > Method/Tool

以下列出设置控制参数的命令：

（1）设置零阶方法的控制参数：

命令：OPSUBP 和命令：OPEQN

（2）设置一阶方法的控制参数：

命令：OPFRST

（3）设置随机搜索法的控制参数：

命令：OPRAND

（4）设置等步长搜索法的控制参数：

命令：OPSWEEP

（5）设置乘子计算法的控制参数：

命令：OPFACT

（6）设置最优梯度法的控制参数：

命令：OPGRAD

（7）设置优化工具的控制参数：

命令：OPUSER

程序还提供了几个总体控制来设置优化过程中数据的存储方法：

（1）指定优化数据的存储文件名（默认为 Jobname.OPT）：

命令：OPDATA

GUI：Main Menu > Design Opt > Controls

（2）用下列方法激活详细的结果输出：

命令：OPPRNT

GUI：Main Menu > Design Opt > Controls

（3）确定最佳设计系列的数据是否存储，用下列方法（默认是数据库和结果文件存储最后一个设计系列）：

命令：OPKEEP

GUI：Main Menu > Design Opt > Controls

还可以控制几个循环特性，包括分析文件在循环中如何读取。可以从第一行读取（默

认），也可以从第 1 个/PREP7 出现的位置开始读取；设置为优化变量的参数可以忽略（默认），也可以在循环中处理。而且，可以指定循环中存储哪种变量：只存储数值变量还是存储数值变量和数组变量。这个功能可以在循环中控制参数的数值（包括设计变量和非设计变量）。用下列方法设置这些循环控制特性：

命令：OPLOOP

GUI：Main Menu > Design Opt > Controls

OPLOOP 命令中的 Parms 变量控制在循环中存储哪个参数。在循环中存储数值变量和数组变量的选项在一般情况下不设置，除非是数组变量在分析文件外定义，而在循环中需要保存的情况。

16.2.7 进行优化分析

所有的控制选项设置好以后，即可进行分析了。用下列方法开始分析：

命令：OPEXE

GUI：Main Menu > Design Opt > Run

在 OPEXE 时，优化循环文件（Jobname.LOOP）会根据分析文件生成。这个循环文件对用户是透明的，并在分析循环中使用。循环在满足下列情况时终止：收敛；中断（不收敛，但最大循环次数或是最大不合理解的数目达到了）；分析完成。

如果循环是由于模型的问题（如网格划分有问题，非线性求解不收敛，与设计变量数值冲突等）中断时，优化处理器将进行下一次循环。如果是在交互方式下，程序将显示一个警告信息并询问是继续还是结束循环。如果是在批处理方式下，循环将自动继续。NCNV 命令（或 GUI 菜单路径：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Criteria to Stop）是控制非线性分析的，在优化循环中将被忽略。中断循环的设计序列是存盘的，但参数的数据有可能非常大，不符合实际情况。

所有优化变量和其他参数在每次迭代后将存储在优化数据文件（Jobname.OPT）中。最多可以存储 130 组这样的序列。如果已经达到了 130 个序列，那么其中数据最不好的序列将被删除。

对于上述梁的例子，优化部分的输入大致如下：

```
/OPT                                  !进入优化处理器
OPANL，…                              !分析文件名(批处理方式不需要)
!
! 指定优化变量
OPVAR，B，DV，.5，16.5                !B 和 H 为设计变量
OPVAR，H，DV，.5，8
OPVAR，DMAX，SV，-0.1，0              !DMAX 和 SMAX 为状态变量
OPVAR，SMAX，SV，0，20000
OPVAR，VOLUME，OBJ                    !VOLUME 为目标函数
!
!指定优化类型和控制
```

```
OPTYPE，SUBP                          !零阶方法
OPSUBP，30                            !最大迭代次数
OPEXE                                 !开始优化循环
```

不同的优化过程可以系列地完成。比如，可以在零阶方法的分析结束后再做等步长搜索。下面的命令对最佳设计序列做等步长搜索：

```
OPTYPE，SWEEP                         !扫描评估工具
OPSWEEP，BEST,5                       !最佳设计序列每个设计变量 5 次评估
OPEXE                                 !开始优化循环
```

16.2.8 查看设计序列结果

优化循环结束以后，可以用本部分介绍的命令或相应的 GUI 路径来查看设计序列。这些命令适用于任意优化方法和工具生成结果。

列出指定序列号的参数值：

命令：OPLIST

GUI：Main Menu > Design Opt > Design Sets > List

可以选择列出所有参数的数值，也可以只列出优化变量。

用图显示指定的参数随序列号的变化，可以看出变量是如何随迭代过程变化的。用以下方法实现：

命令：PLVAROPT

GUI：Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs/Tables

将图的 X 轴用序列号换成其他参数：

命令：XVAROPT

GUI：Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs/Tables

对于 PLVAROPT 和 PRVAROPT 操作，设计序列将自动按照“XVAROPT”中参数以升序排列。对于等步长，乘子和梯度工具有一些特别的查看结果的方法。对于等步长搜索，用“OPRSW”命令列出结果，用“OPLSW”命令图示结果。对于乘子工具，用“OPRFA”命令列出结果，用“OPLFA”命令图示结果。对于梯度工具，用“OPRGR”命令列出结果，用“OPLGR”命令图示结果。

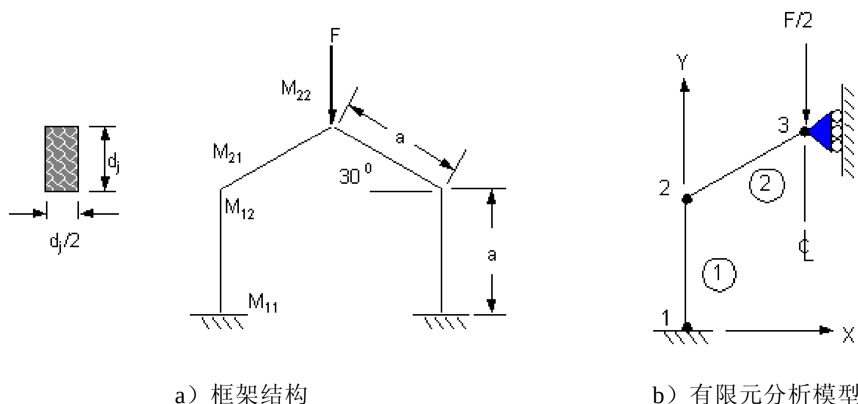
另一个得到优化数据的方法是用“STATUS”命令(Main Menu > Design Opt > Status)。在优化处理器中使用本命令，将得到另外一些关于当前优化任务的信息，如分析文件名，优化技术，设计序列数，优化变量等。用“STATUS”命令可以方便地查看优化环境，验证需要的设置是否全部输入优化处理器。

除了查看优化数据，可能希望用 POST1 或 POST26 对分析结果进行后处理。默认情况下，最后一个设计序列的结果存储在文件 “Jobname.RST”(或.RTH 等，视分析类型而定)中。如果在循环运行前将“OPKEEP”设为“ON”，最佳设计序列的数据也将存储在数据库和结果文件中。“最佳结果”在文件“Jobname.BRST”(.BRTH 等)中，“最佳数据库”在文件“Jobname.BDB”中。

16.3 实例导航——框架结构的优化设计

16.3.1 问题描述

图 16-3a 所示为一个有 4 根杆组成的框架结构，杆截面为矩形，宽为高的一半。在中间位置承受纵向载荷，载荷值 F＝4000N，求框架的最小体积。已知框架的材料特性为：E=10e10 Pa，a=2.5m。



a）框架结构　　b）有限元分析模型

图 16-3 框架结构示意图

根据分析问题的对称性，选择左边两根杆的有限元分析模型，以矩形杆的高度d_j为设计变量，横截面积$A_j=0.5d_j^2$以及惯性矩$I_j=1/24d_j^4$为设计变量的参数表达式，以矩形杆端点的弯矩值为状态变量，目标函数为框架的最小体积，综上所述，该问题的优化数学模型为：

$$\text{Min}=f(x),\ x=[d_j],\ 0.05\leqslant d_j\leqslant 0.5,\ 825000\,d_j^3-M_{ij}>0$$

16.3.2 GUI方式

01 有限元建模。

❶定义工作文件名：Utility Menu > File > Change Jobname，在弹出的“Change Jobname”对话框中输入文件名为“frame”，单击“OK”按钮。

❷定义工作标题：Utility Menu > File > Change Title，在弹出的“Change Title”对话框中输入“Optimization of a Frame Structure”，单击“OK”按钮。

❸关闭坐标符号的显示：Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options，弹出“Window Options”对话框。在“Location of triad”下拉式选择栏中选择“Not Shown”，单击“OK”按钮。

❹定义参数的初始值：Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters，弹出如图 16-4 所示的“Scalar Parameters”对话框，在“Items”下的文本框中输入“D1=0.1”，单击“Accept”按钮；D2=0.1，单击“Accept”按钮；K＝825000，单击“Accept”按钮；D1CB＝D1**3，

单击“Accept”按钮；D2CB＝D2**3，单击“Accept”按钮，然后单击“Close”按钮关闭它。

❺设置材料属性：Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Model，弹出如图 16-5 所示的“Define Material Model Behavior”对话框。在“Material Model Available”下双击 Structural > Linear > Elastic > Isotropic，弹出如图 16-6 所示的“Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1”对话框，输入“EX”为 1E+011，“PRXY”为 0.3，单击“OK”按钮，单击菜单栏上的 Material > Exit，完成材料属性的设置。

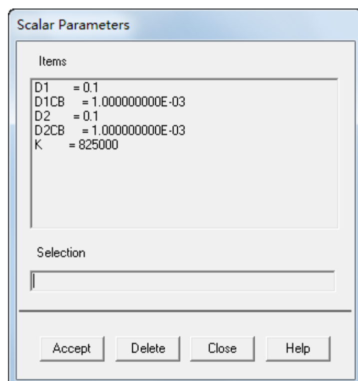


图 16-4 “Scalar Parameters”对话框

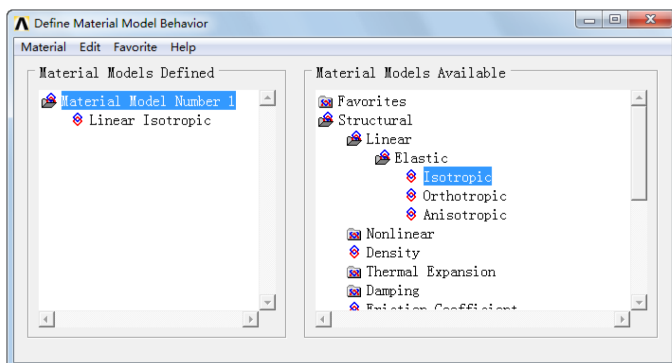


图 16-5 “Define Material Model Behavior”对话框

❻选择单元类型：Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete，弹出如图 16-7 所示的“Element Type”对话框，单击“Add”按钮，又弹出如图 16-8 所示的“Library of Element Types”对话框，在选择框中选择选项，单击“OK”按钮，然后单击“Close”按钮关闭图 16-9 的“Element Types”对话框。

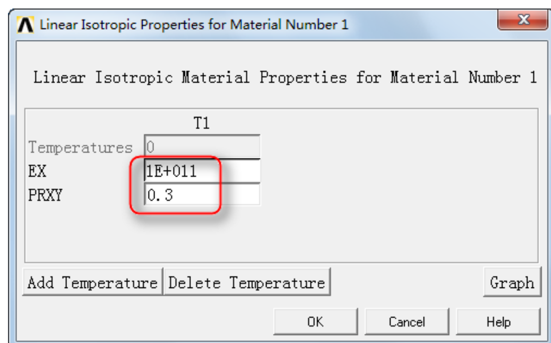


图 16-6 “Linear Isotropic Material Properties for Material number 1”对话框

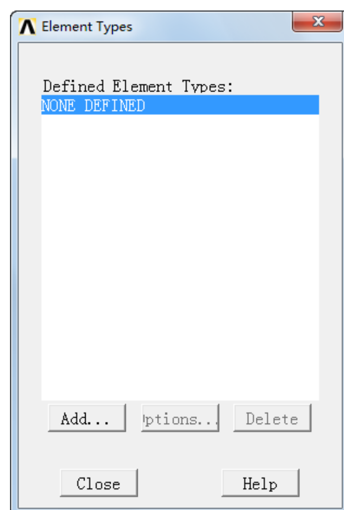


图 16-7 “Element Types”对话框

❼定义杆件材料性质：Main Menu > Preprocessor > Sections > Beam > Common

Section，弹出如图 16-10 所示的“Beam Tool”对话框，在“Sub-Type”下拉列表中选择矩形，在 B 中输入矩形宽度为“D1/2”，在 H 中输入矩形长度为“D1”，单击“OK”按钮。

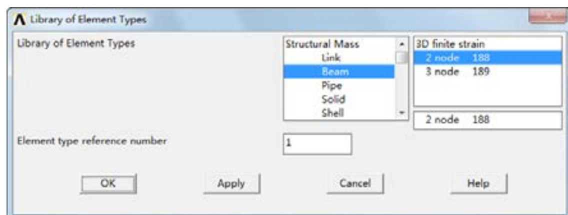
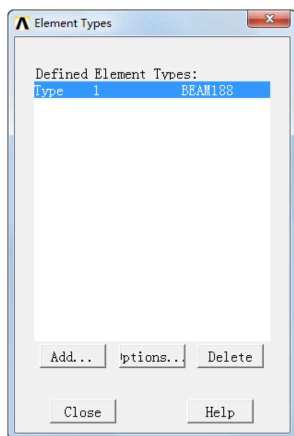


图 16-8 “Library of Element Types”对话框



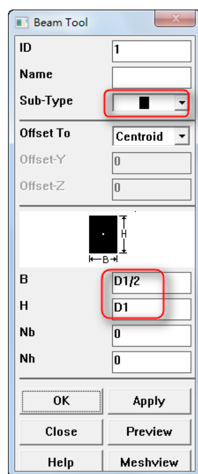


图 16-9 “Element Types for real Con stants”对话框　　图 16-10 “Beam Tool”对话框

❽生成有限元节点：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS，弹出如图 16-11 所示的“Create Nodes in Active Coordinate System”对话框，在“Node number”后面的输入栏中输入“1”，在“X,Y,Z Location in active CS”后面的输入栏中输入“0、0、0”，单击“Accept”按钮；又弹出此对话框，在“Node number”后面的输入栏中输入 2，在“X，Y，Z”后面的输入栏中输入“0、2.5、0”，单击“Accept”按钮，再弹出此对话框，在“Node number”后面的输入栏中输入 3，在“X，Y，Z”后面的输入栏中输入“2.16506，3.75，0”，单击“OK”按钮。生成结果如图 16-12 所示。

❾打开结点编号显示：Utility Menu > PlotCtrls > Numbering，弹出如图 16-13 所示的“Plot Numbering Controls”对话框。选择“Node number”复选框为“ON”，单击“OK”按钮。

❿生成第 1 个单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，弹出一个拾取框，拾取编号为 1 和 2 的节点，单击“OK”按钮。

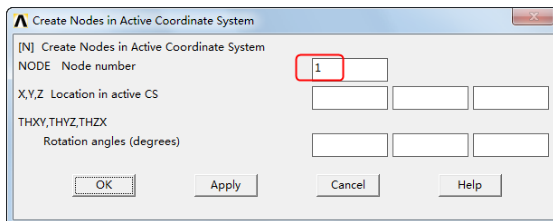


图 16-11 “Create Nodes in Active Coordinate System”对话框

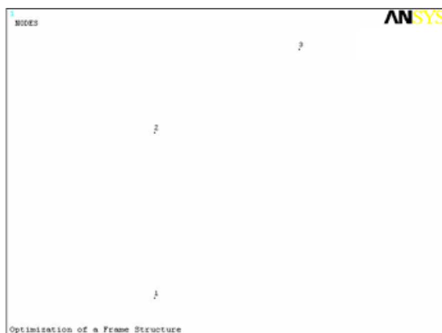


图 16-12 生成节点的结果

⓫改变单元属性：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes，弹出如图 16-14 所示的“Element Attributes”对话框，单击“OK”按钮。

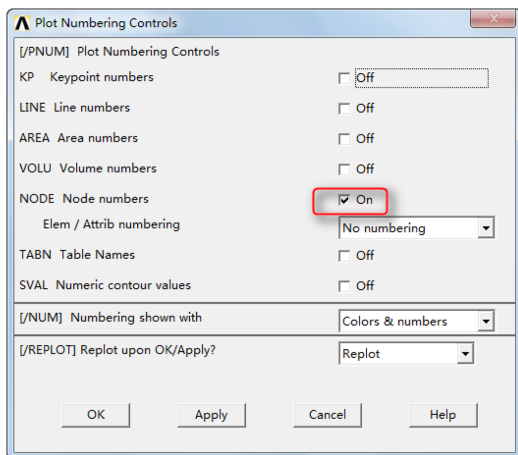


图 16-13 “Plot Numbering Controls”对话框

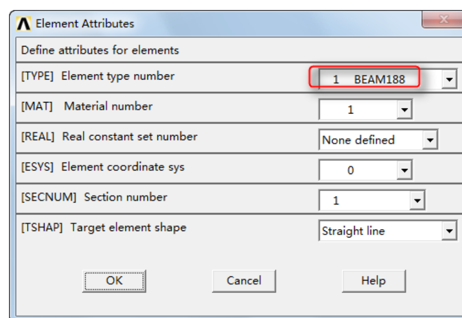


图 16-14 “Element Attributes”对话框

⓬生成第 2 个单元：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Auto Numbered > Thru Nodes 命令，弹出一个拾取框，拾取编号为 2 和 3 的节点，单击“OK”按钮。生成的结果如图 16-15 所示。

02 求解。

❶施加约束：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes，弹出一个拾取框。拾取编号为 1 的节点，单击“OK”按钮，

弹出如图 16-16 所示的“Apply U，ROT on Nodes”的对话框，在“DOFs to be constrained”选择栏中选择“All DOF”，单击“OK”按钮。

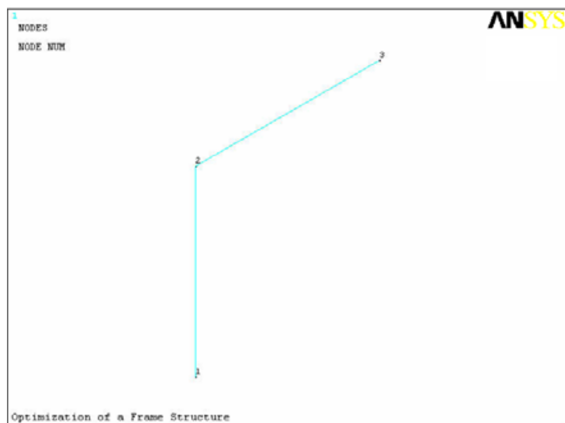


图 16-15 生成单元的结果显示

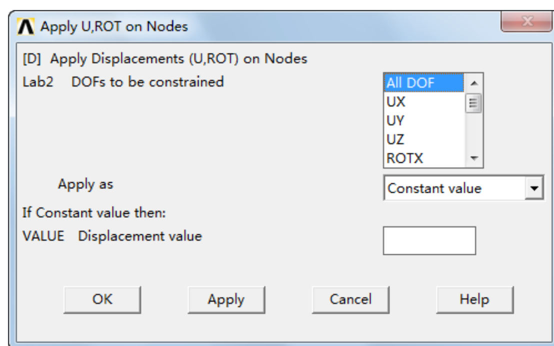


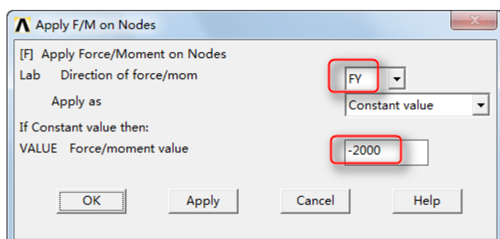
图 16-16 “Apply U，ROT on Nodes”的对话框

❷施加集中载荷：Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/ Moment > On Nodes，弹出一个拾取框，拾取编号为 3 的节点，单击“OK”按钮，弹出如图 16-17 所示的“Apply F/M on Nodes”的对话框，在“Direction of force/mom”下拉列表框中选择“FY”，在“Force/moment value”文本框中输入−2000，单击“OK”按钮。

❸选择节点：Utility Menu > Select > Entities，弹出如图 16-18 所示的“Select Entities”对话框，单击选择第二个下拉式选择栏选中“By Location”项，在“Min，Max”下的输入栏中输入“2.1，2.2”，单击“OK”按钮。

❹施加对称约束：Main Menu > Solution > Defien Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C. > On Node，弹出如图 16-19 所示的“Apply SYMM on Nodes”对话框，不用改变设置直接单击“OK”按钮。

❺选择所有实体：Utility Menu > Select > Everythig，单击菜单栏 Plot > Replot 重新显示结果如图 16-20 所示。



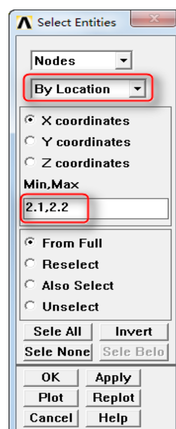
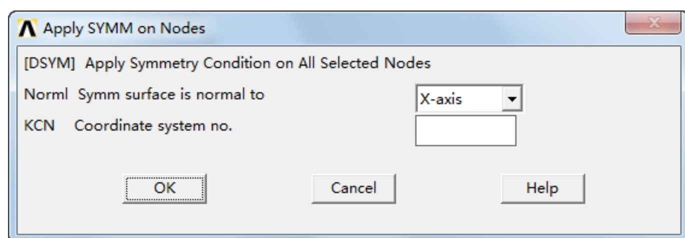


图 16-17 “Apply F/M on Nodes”的对话框　　　图 16-18 “Select Entities”对话框

❻保存数据：单击工具栏中的“Save_DB”按钮。



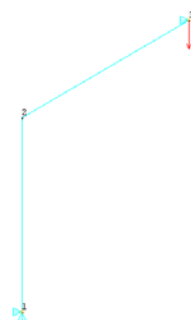


图 16-19 “Apply SYMM on Nodes”对话框　　　图 16-20 结果显示

❼求解运算：Main Menu > Solution > Solve > Current LS，弹出一个信息提示框和对话框，浏览完毕后菜单上的 File > Close，单击“OK”按钮，开始求解运算，当出现一个 Solution is done 的信息提示框时，单击“Close”按钮，完成求解运算。

❽保存优化结果到文件：Utility Menu > File > Save as，在弹出的对话框中，输入文件名为“frame_resu”，单击“OK”按钮。

03 优化设置。

❶定义体积单元表：Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table，弹出 Element Table Data 对话框，如图 16-21 所示，单击“Add”按钮，弹出如图 16-22 所示的“Define Additional Element Table Items”对话框，在“User label for item”后面的文本框中输入“EVOL”，又在“Item,Comp Results data item”的左栏中选择“Geometry”，在右栏中选择“Elem Volume VOLU”，单击“Accept”按钮。

❷定义弯矩单元表：又弹出如图 16-22 所示的对话框，在“User lable for item”后面的文本框中输入“mi”，又在“Item,Comp Results data item”的左栏中选择“By Sequence

Num”，在右栏中选择“SMISC”，在其下面出现的“SMISC”后面的文本框中输入 6（表示序列号为 6），单击“Accept”按钮，再次弹出如图 16-22 所示的对话框，在“User Lable for item”后面的文本框中输入“mj”，又在“Item,Comp Results data item”的左栏中选择“By Sequence Num”，在右栏中选择“SMISC”，在其下面出现的“SMISC”后面的文本框中输入 12（表示序列号为 12），单击“OK”按钮，又单击“Element Table Data”对话框上的“Close”按钮，关闭该对话框。

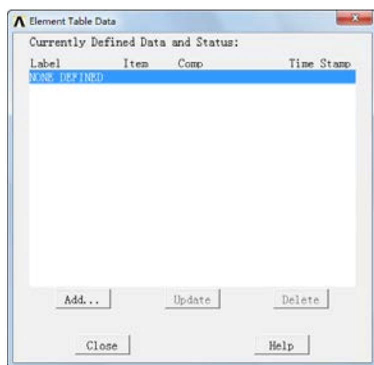


图 16-21 “Element Table Data”对话框

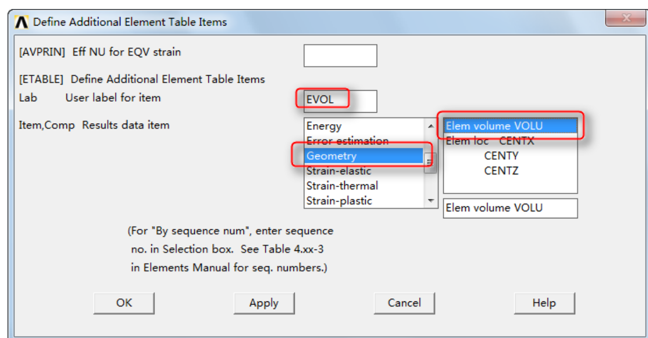


图 16-22 “Define Additional Element Table Items”对话框

❸得到第一杆的弯矩 M11：Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data 命令，弹出“Get Scalar Data”对话框，如图 16-23 所示。在“Type of data to be retrieved”的左栏中选择“Results data”，在右栏中选择“Elem table data”，单击“OK”按钮，弹出“Get Element Table Data”对话框，如图 16-24 所示，在“Name of parameter to be defined”后面的文本框中输入“m11”，在“Element Number N”后面的文本框中输入“1”，在“Elem table data to be retrieved”后面的下拉列表中选取“MI”，单击“Accept”按钮。

❹得到第一杆的弯矩 M21：又弹出“Get Scalar Data”对话框，在“the Type of data to be retrieved”的左栏中选择“Results Data”，在右栏中选择“Elem table data”，单击“OK”按钮，弹出“Get Element Table Data”对话框，如图 16-24 所示，在“Name of parameter to be defined”后面的文本框中输入“m11”，在“Element number N”后面的文本框中输入“1”，在“Elem table data to be retrieved”后面的下拉列表中选取“MI”，单击“Accept”

按钮。

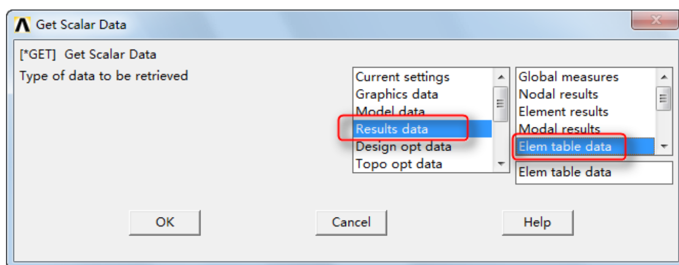


图 16-23 “Get Scalar Data”对话框

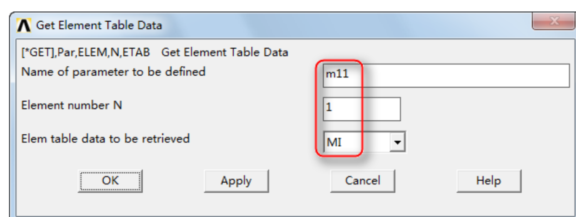


图 16-24 “Get Element Table Data”对话框

❺得到第二杆的弯矩 M12：又弹出“Get Scalar Data”对话框，在“Type of data to be retrieved”的左栏中选择“Results data”，在右栏中选择“Elem table data”，单击“Apply”按钮，弹出“Get Element Table Data”对话框，如图 16-24 所示，在“Name of parameter to be defined”后面的文本框中输入“m11”，在“Element number N”后面的文本框中输入“1”，在“Elem table data to be retrieved”后面的下拉列表中选择“MI”，单击“Accept”按钮。

❻得到第二杆的弯矩 M22：又弹出“Get Scalar Data”对话框，在“Type of Data to be retrieved”的左栏中选择“Results data”，在右栏中选择“Elem table data”，单击“OK”按钮，弹出“Get Element Table Data”对话框，如图 16-24 所示，在“Name of parameter to be defined”后面的文本框中输入“m22”，在“Element number N”后面的文本框中输入“2”，在“Elem table data to be retrieved”后面的下拉列表中选择“MJ”，单击“OK”按钮。

❼得到计算弯矩的绝对值：Utility Menu > Parameters > Scalar Parameter 命令，弹出“Scalar Parameters”对话框，在“Selection”下面的文本框中输入以下信息：“LIM1＝D1CB*K，LIM2=D2CB*K，M11=LIM1-ABS（M11），M21=LIM1-ABS（M21），M12=LIM2-ABS（M12），M22=LIM2-ABS（M22）”，每输入一次单击“Accept”按钮一次，最后单击“Close”按钮关闭该对话框。

❽计算单元体积和弯矩的总和：Main Menu > General Postproc > Element Table > Sum of Each Item 命令，弹出“Tabular Sum of Each Element Table Item”对话框，单击“OK”按钮，弹出一个信息窗口，如图 16-25 所示。选择该窗口菜单栏上的 File > Close，关闭

该窗口。

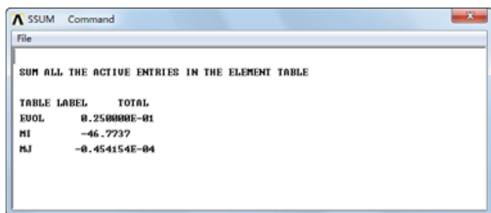


图 16-25 单元体积及弯矩显示

❾取出体积的值：Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data 命令，弹出“Get Scalar Data”对话框。在“Type of data to be retrieved”的左栏中选择“Results data”，在右栏中选择“Elem table sums”，单击“OK”按钮，弹出“Get Element Table Sum Results ”对话框，如图 16-26 所示，在“Name of parameter to be defined”后面的文本框中输入“VTOT”，单击“OK”按钮关闭对话框。

❿显示当前设计：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Size and Shape 命令，弹出“Size and Shape”对话框，单击“Display of element shapes based on real constant description”后面的复选框，使其为“On”。在“Real constant multiplier”后面的文本框中输入 2，如图 16-27 所示，单击“OK”按钮。

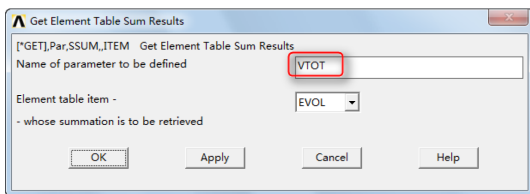


图 16-26 “Get Element Table Sum Results ”对话框

⓫改变视图方向：Utility Menu > PlotCtrls > Pan,Zoom,Rotate，打开“Pan-Zoom-Rotate”工具栏。单击“Iso”按钮，Utility Menu > Plot > Elements，结果如图 16-28 所示。

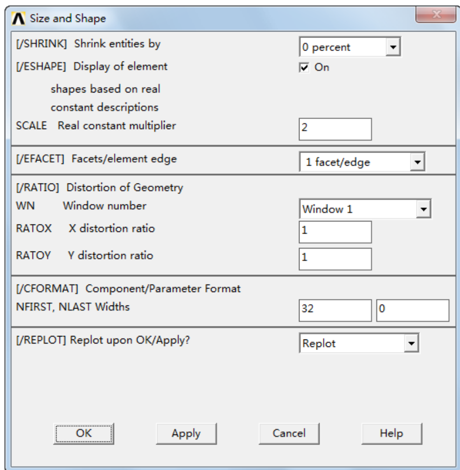


图 16-27 “Size and Shape”对话框

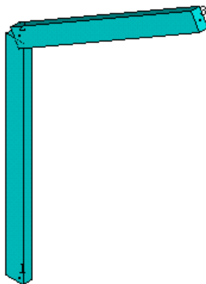


图 16-28 单元形状与大小的显示

⑫生成优化分析文件：Utility Menu > File > Write DB Log File，弹出“Write Database Log”对话框。在“Write Database Log To”下面的文本框中输入分析文件名“frame.lgw”到路径名中，单击“OK”按钮。

⑬指定分析文件：Main Menu > Design Opt > Analysis File > Assign，弹出“Assign Analysis File”对话框。在“File name”列表栏中指定“frame.lgw”，单击“OK”按钮。

⑭定义优化设计变量：Main Menu > Design Opt > Design variables 命令，弹出“Design Variables”对话框。单击“Add”按钮，弹出“Define a Design Variable”对话框，如图 16-29 所示，在“Parameter name”的列表栏中选择“D1”；在“Minimum value”后面的文本框中输入 0.05，在“Maximum value”后面的文本框中输入 0.5，单击“Accept”按钮，重复上述操作，依次输入“D2，0.05，0.5”，单击“OK”按钮，单击“Close”按钮关闭“Design Variables”对话框。

⑮定义优化状态变量：Main Menu > Design Opt > State Variables 命令，弹出“State Variables”对话框。单击“Add”按钮，弹出如图 16-30 所示的“Define a State Variable ”对话框。在“Parameters name”的列表栏中选择“M11”，在“Minimum value”后面的文本框中输入 0，在“Maximum value”后面的文本框中输入 2000，单击“Accept”按钮，重复上述操作过程，选择“M21”，输入 2000；选择“M12”，输入 2000；选择“M22”，输入 2000，最后单击“OK”按钮，又单击“Close”按钮关闭对话框。

⑯存储优化数据库：Main Menu > Design Opt > Opt Database > Save 命令，弹出“Save Optimization Data”对话框。在“File Name”下的文本框中输入“frame.opt”，单击“OK”按钮。

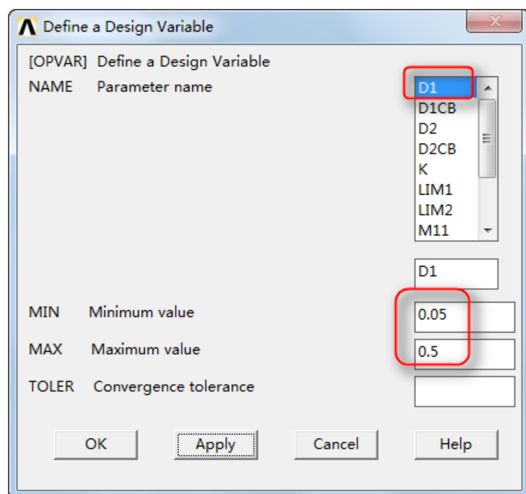


图 16-29 “Define a Design Variable”对话框

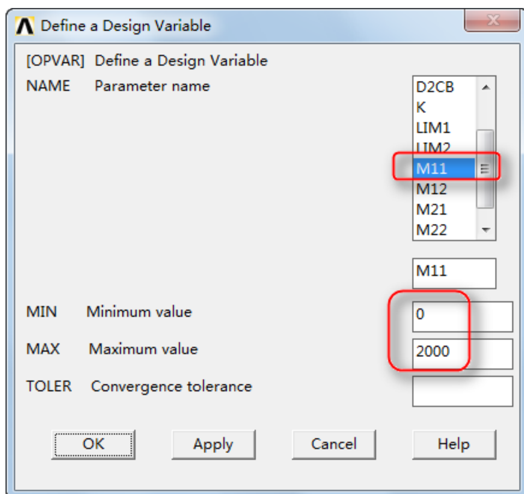


图 16-30 “Define a State Variable” 对话框

⑰设置体积为目标函数：Main Menu > Design Opt > Objective 命令，弹出如图 16-31 所示的“Define Objective Function”对话框。在“Parameter name”的列表栏中选择“M11”，在“Convergence tolerance”后面的文本框中输入 0.00001，单击“OK”按钮。

⑱指定一阶优化方法：Main Menu > Design Opt > Method/Tool 命令，弹出如图 16-32

所示的“Specify Optimization Method”对话框，选择“Sub-Problem”，单击“OK”按钮，弹出如图 16-33 所示的“Controls for Sub-Problem Optimization”对话框，在“Maximum iterations”后面的文本框中输入 15，单击“OK”按钮。

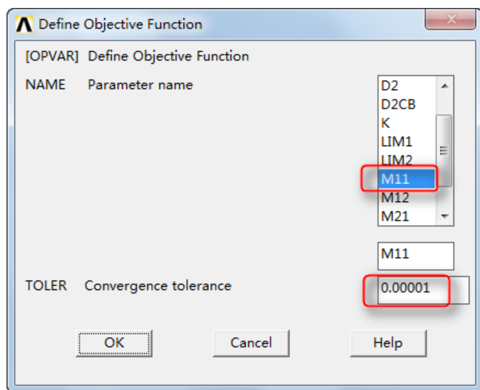


图 16-31 “Define Objective Function”对话框

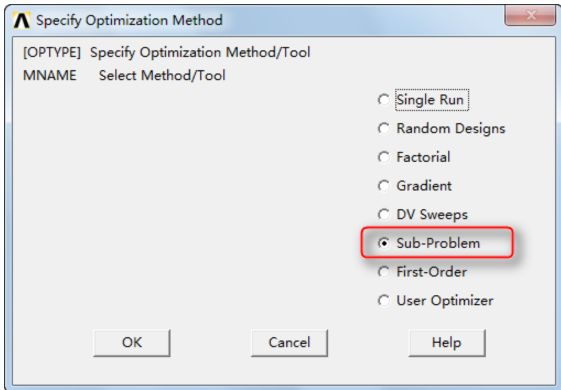


图 16-32 “Specify Optimization Method”对话框

⑲运行优化：Main Menu > Design Opt > Run 命令，弹出“Begin Execution of Run”对话框，如图 16-34 所示，查看分析信息后，单击“OK”按钮开始优化运算。当系统出现如图 16-35 所示的“Execution summary”对话框时，表明优化过程已经结束，单击“OK”按钮。

⑳保存优化结果到文件：Utility Menu > File > Save as，在弹出的对话框中输入文件名为“frame_Opt_resu”，单击“OK”按钮。

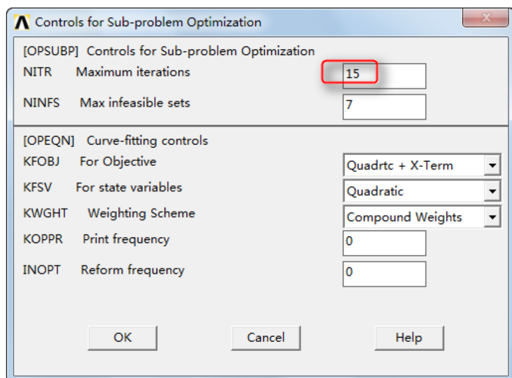


图 16-33 “Controls for First-Order Optimization”对话框

04 查看优化结果。

❶列出最佳设计序列：Main Menu > Design Opt > Design Sets > List 命令，弹出如图 16-36 所示的“List Design Sets”对话框，在单选按钮栏中选中“BEST Set”，单击“OK”按钮，弹出“OPLIST Command”窗口，最佳序列的结果即每个设计变量、状态变量和目标函数的值都在此窗口中，如图 16-37 所示。

❷列出所有序列的结果：Main Menu > Design Opt > Design Sets > List 命令，弹出如图 16-36 所示的对话框，在单选按钮栏中选中“ALL Sets”，单击“OK”按钮，弹出如

图 16-38 所示的信息窗口，所有迭代序列的结果即每个设计变量、状态变量和目标函数的值都在此窗口中，单击菜单栏上的 File > Close 即可关闭该窗口。

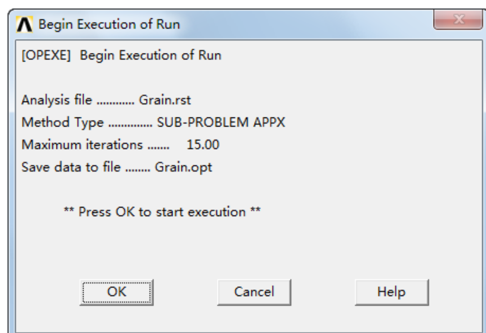


图 16-34 “Begin Execution of Run”对话框

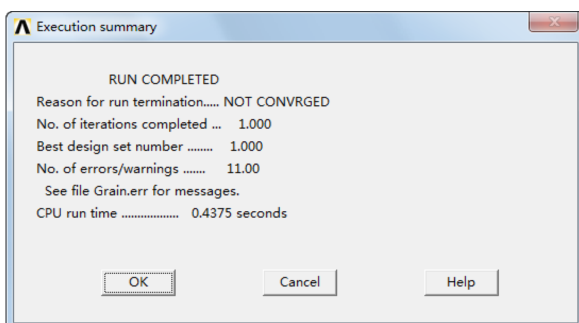


图 16-35 “Execution summary”对话框

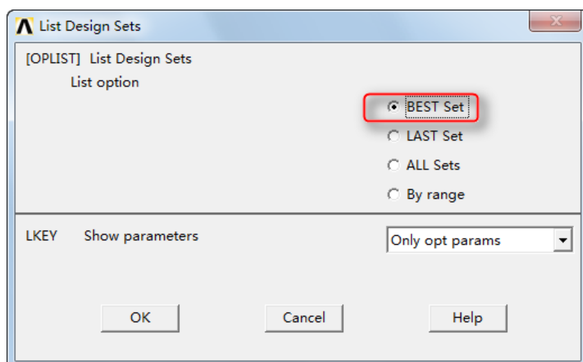


图 16-36 “List Design Sets”对话框

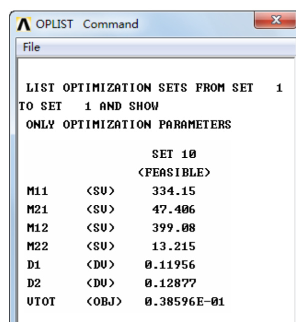


图 16-37 “OPLIST Command”窗口

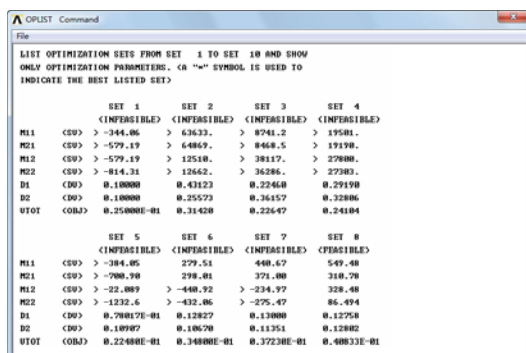


图 16-38 列出所有序列的优化运行结果

❸改变视图方向：Utility Menu > PlotCtrls > Pan,Zoom,Rotate ，打开“Pan-Zoom –Rotate”工具栏，选择“Front”，即选择 X-Y 平面视角，单击“Close”按钮关闭该工具栏。

❹设置坐标轴标题：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes 命令，弹出如图 16-39 所示的“Axes Modifications for Graph Plots”对话框。在“X-axis label”

后面的文本框中输入“Iteration number”，在“Y-axis label”后面的文本框中输入“structure”，单击“OK”按钮。

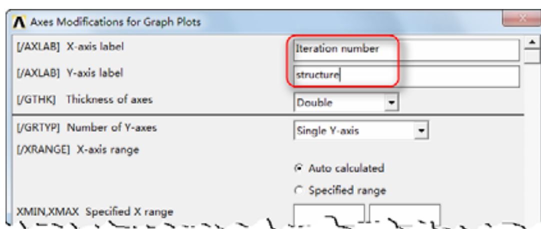


图 16-39　“Axes Modifications for Graph Plots”对话框

❺显示体积的变化规律：Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs/Tables 命令，弹出如图 16-40 所示对话框，在“Y-variable params”列表栏中选择“VTOT”，单击“OK”按钮，其结果如图 16-41 所示。

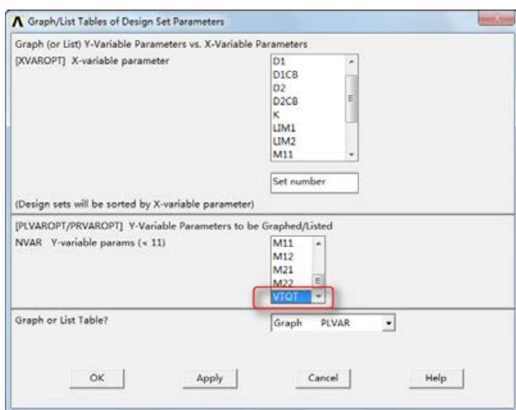


图 16-40　“Graph/List Tables of Design Set Parameters”对话框

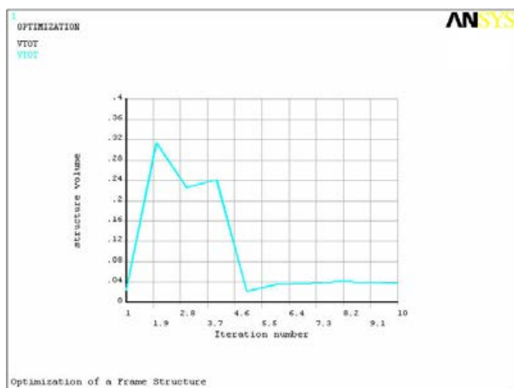


图 16-41　目标函数的变化规律显示

❻设置坐标轴标题：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes 命令，

弹出“Graph Controls”对话框。在“Y-Axis Label”后面的文本框中输入“BASE DIMENSION”，单击“OK”按钮。

❼显示 D1 的变化规律：Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs/Tables 命令，弹出如图 16-40 所示的对话框，在“Y-variable params”的列表栏中选择“D1”，单击“OK”按钮，其结果如图 16-42 所示。

❽显示 D2 的变化规律：Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs/Tables 命令，弹出如图 16-40 所示的对话框，在“Y-variable params”的列表栏中选择“D2”，单击“OK”按钮，其结果如图 16-43 所示。

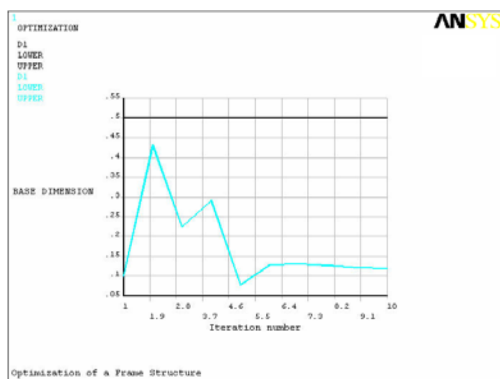


图 16-42 基本尺寸 D1 的变化规律

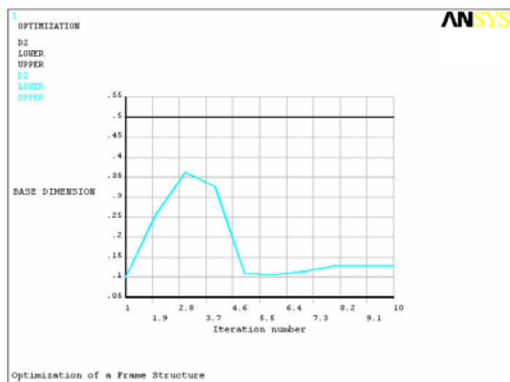


图 16-43 基本尺寸 D2 的变化规律

❾设置坐标轴标题：Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes 命令，弹出“Graph Controls”对话框。在“Y-Axis Label”后面的文本框中输入“MAXIMUM MOMENT”，单击“OK”按钮。

❿显示弯矩的变化规律：Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs/Tables 命令，弹出对话框，如图 16-40 所示，在“Y-variable params”列表栏中选择“M11，M21，M12，M22”，单击“OK”按钮，其结果如图 16-44 所示。

05 退出 ANSYS。单击工具栏中的“Quit”按钮，在弹出的对话框中选择“Quit—No Save!”，单击“OK”按钮，结束 ANSYS 运行，退回到 Windows 操作界面。

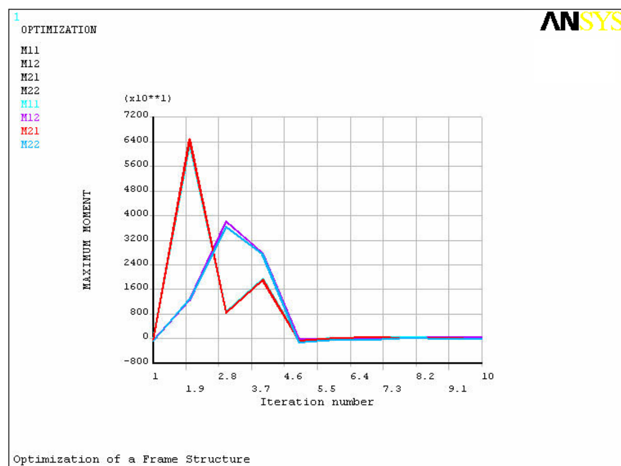


图 16-44 杆端点弯矩的变化规律

16.3.3 命令流方式

略，见随书光盘电子文档。

责任编辑：曲彩云
封面设计：王 玮

ANSYS工程应用系列丛书



《ANSYS 14.0有限元分析从入门到精通》

ANSYS 14.0/FLOTRAN流场分析从入门到精通

ANSYS 14.0机械与结构有限元分析从入门到精通

ANSYS 14.0多物理耦合场有限元分析从入门到精通

ANSYS 14.0土木工程有限元分析从入门到精通

ANSYS 14.0电磁学有限元分析从入门到精通

ANSYS 14.0热力学有限元分析从入门到精通

ANSYS Workbench 14.0有限元分析从入门到精通

ANSYS 14.0/LS-DYNA非线性有限元分析实例指导教程

FLUENT 14.0流场分析从入门到精通

上架指导：计算机 CAD/CAM/CAE

ISBN 978-7-111-40711-9

地 址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

邮政编码：100037
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版



定价：69.00（含1DVD）